



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Evaluación de emisiones de N₂O en sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Treball realitzat per:

Montserrat G. Ramírez Melgarejo

Dirigit per:

Santiago Gassó Domingo

Leonor Patricia Güereca Hernández

Màster en:

Enginyeria Ambiental

Barcelona, 23 de juny de 2016

Departament d'Enginyeria de Projectes i de la
Construcció

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Agradecimientos

- ✚ A los tutores de este trabajo final de máster por sus conocimientos, orientación y apoyo brindado.
- ✚ A las personas e instituciones que aportaron información para poder desarrollar este trabajo (AMB, CDMX, Aguascalientes).
- ✚ A CONACYT por proporcionar los medios para mi desarrollo académico.
- ✚ A Barcelona por el crecimiento personal e intelectual.
- ✚ A los amigos que encontré aquí por los momentos compartidos.
- ✚ A mi familia porque aun en la distancia siempre han estado conmigo.

Resumen

Este trabajo final de master evalúa el conocimiento existente sobre la emisión de N₂O de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), compara metodologías de cálculo y realiza una cuantificación de emisión de N₂O de PTAR situadas en México y el Área Metropolitana de Barcelona (AMB). El AMB cuenta con plantas avanzadas que eliminan los nutrientes antes de que el efluente sea descargado al medio natural; mientras que las PTAR en México no eliminan el nitrógeno ni el fósforo, debido al alto costo que conlleva una eliminación de nutrientes del agua residual.

El óxido nitroso es un GEI de preocupación ambiental, tiene un poder de calentamiento 265 veces mayor que el CO₂, y debido a las actividades antropogénicas durante los últimos 20 años ha incrementado paulatinamente su concentración en la atmosfera un 7%.

Los datos utilizados para la realización de este trabajo fueron proporcionados por las entidades oficiales del Área Metropolitana de Barcelona, el estado de Aguascalientes y la Ciudad de México; también se contó con información pública de los sitios web oficiales de cada organismo gubernamental (GENCAT, SEMARNAT, CONAGUA, INECC).

Los métodos utilizados para la estimación de emisión de N₂O desde las PTAR de estudio, son el método del IPCC (IPCC 2006), el método de Doorn y Liles (Doorn y Liles 1999), y el método propuesto por Lara y Préndez (Lara y Préndez 2003).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales son generadoras de este GEI, las aguas residuales contienen N de las proteínas en los alimentos que ingiere diariamente la población. La emisión de N₂O puede darse durante el tratamiento del agua residual o una vez que el efluente es descargado a un medio receptor natural bajo condiciones de pH y temperatura idóneas para su generación.

En PTAR avanzadas, la generación de N₂O se produce en el tratamiento de eliminación de nutrientes, según la literatura y los resultados obtenidos, esta emisión se considera despreciable, en comparación a la emisión que se genera en PTAR básicas donde no existe un tratamiento de eliminación de nutrientes, y por lo tanto estos llegan al medio receptor natural, donde los nutrientes crean un desequilibrio en el sistema y se da la emisión de óxido nitroso. Durante el tratamiento de lodos, también se genera una emisión de óxido nitroso.

A partir de este trabajo, se concluye que debe existir mayor impulso e investigación para la reducción de este GEI desde el tratamiento de las aguas residuales, desarrollar métodos de cálculo en cada país y zona de estudio, con sus propios parámetros de medición y no tomarse de manera genérica o por defecto.

Contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	7
1.1	Gases de Efecto Invernadero	7
1.1.2	Situación GEI en México.....	9
1.1.3	Situación GEI en España	9
1.2	Objetivos	10
2	ESTADO DEL ARTE	11
2.1	Procedencia de la emisión del N ₂ O	11
2.2	Importancia de cuantificación y metodologías aplicables al N ₂ O	12
3	CASO DE ESTUDIO	23
3.1	Situación GEI en México	23
3.2	Situación del Estado Actual del Tratamiento de Aguas Residuales en Ciudad de México y Ciudad de Aguascalientes	25
3.3	Situación GEI en Cataluña	28
3.4	Situación del Estado Actual del Tratamiento de Aguas Residuales en específico del AMB	30
4	METODOLOGÍA	32
4.1	Emisiones Directas de N ₂ O - IPCC.....	33
4.2	Emisiones Indirectas de N ₂ O - IPCC.....	33
4.3	Emisiones de N ₂ O del tratamiento de aguas residuales - Doorn y Liles.....	34
4.4	Emisiones de N ₂ O del tratamiento de lodos - Lara y Préndez	34
5	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
5.1	Emisiones Directas de N ₂ O - IPCC.....	36
5.2	Emisiones Indirectas de N ₂ O – IPCC	37
5.3	Emisiones del tratamiento de aguas residuales – Doorn y Liles y del tratamiento de lodos – Lara y Préndez	39
6	CONCLUSIONES.....	45
7	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	47
8	ANEXOS.....	51
8.1	Anexo A	51
8.2	Anexo B	52
8.3	Anexo C.....	70

Lista de Figuras

Figura 1. Inventario Nacional de Emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero México 2013. (Fuente: INECC)	24
Figura 2. Emisión de GEI por sectores en Cataluña 2013. (Fuente: GENCAT 2013)	29
Figura 3. Evolución del caudal de agua residual tratada en AMB (millones de m ³ /año). (Fuente: AMB 2016).....	30
Figura 4. Emisión Directa de N ₂ O en el 2015 por PTAR del AMB.....	36
Figura 5. Emisiones Directas e Indirectas de N ₂ O del AMB en 2015.	37
Figura 6. Emisión de N ₂ O de aguas servidas en Aguascalientes y Ciudad de México 2015.....	38
Figura 7. Óxido nitroso emitido de las aguas servidas vs emisión total a escala nacional en México.	39
Figura 8. Óxido nitroso emitido desde PTAR del AMB en 2015.....	40
Figura 9. Óxido nitroso emitido desde PTAR de la CDMX en 2015.....	41
Figura 10. Óxido nitroso emitido en 2015 CDMX vs AMB.	41
Figura 11. Emisión total CDMX vs AMB 2015.	43
Figura 12. Emisión total N ₂ O Aguascalientes, Ciudad de México y AMB por ambos métodos. ..	43

Lista de Tablas

Tabla 1. Características de los principales GEI. (Fuente:(Myhre et al. 2013)(IPCC 2014))	7
Tabla 2. Cuantificación N ₂ O por método IPCC – Emisión Directa. (Fuente: (IPCC 2006))	14
Tabla 3. Cuantificación N ₂ O por método IPCC – Emisión Indirecta. (Fuente: (IPCC 2006)).....	14
Tabla 4. Cuantificación N ₂ O por método Doorn y Liles. (Fuente: (Doorn y Liles 1999)).....	15
Tabla 5. Cuantificación N ₂ O por método Lara y Préndez. (Fuente: (Lara y Préndez 2003)).....	16
Tabla 6. Cuantificación N ₂ O por método US EPA. (Fuente: (CH2MHILL 2008))	16
Tabla 7. Cuantificación GEI por método Kyung. (Fuente: (Kyung et al. 2015))	17
Tabla 8. Cuantificación N ₂ O por método CEC. (Fuente: (CH2MHILL 2008)).....	18
Tabla 9. Cuantificación N ₂ O por método Dinamarca – Emisión Directa. (Fuente: (Thomsen y Lyck 2005))	19
Tabla 10. Cuantificación N ₂ O por método Dinamarca – Emisión Indirecta. (Fuente: (Thomsen y Lyck 2005))	19
Tabla 11. Cuantificación N ₂ O por método Windsor – Emisión Directa e Indirecta. (Fuente: (Das 2011))	20
Tabla 12. Cuantificación N ₂ O por método Chandran. (Fuente: (Rti 2010))	21
Tabla 13. Emisión Neta de GEI en México 2013. (Fuente: INEEC-SEMARNAT, actualización 2013)	23
Tabla 14. Emisión GEI en México 2014 (Fuente: INEGI 2015)	23
Tabla 15. Metas de reducción de GEI en México (Fuente: (SEMARNAT y CONAGUA 2014))	24
Tabla 16. Inventario de PTAR en la CDMX (CONAGUA 2014b).....	25
Tabla 17. Inventario de PTAR en la Ciudad de México (CONAGUA 2014b).....	26
Tabla 18. Inventario de PTAR en la Ciudad de Aguascalientes (CONAGUA 2014b).	26
Tabla 19. Inventario de PTAR en la Ciudad de Aguascalientes (CONAGUA 2014b)	27
Tabla 20. Emisión Neta de GEI en Cataluña 2013. (Fuente: GENCAT 2013).....	28
Tabla 21. Emisión GEI en Cataluña 2012 (Fuente: (GENCAT 2013b))	28

Tabla 22. Emisión de GEI por Tratamiento de aguas residuales en Cataluña 2013. (Fuente: GENCAT 2013)	29
Tabla 23. Emisiones difusas Cataluña vs Objetivo Protocolo de Kioto. (Fuente: (GENCAT 2013a))	29
Tabla 24. Plantas de tratamiento de agua residual en AMB 2015. (Fuente: AMB 2016)	30
Tabla 25. Caudal Total Tratado en Plantas de tratamiento de aguas residuales del AMB (m ³ /año). (Fuente: AMB 2016)	31
Tabla 26. Conversión a tCO ₂ e. (Fuente: (Lexmond y Zeeman Grietje 1995))	32
Tabla 27. Cantidades típicas de lodos producidos a partir de diversas operaciones y procesos de tratamiento de aguas residuales. (Fuente: (Metcalf y Eddy 2014))	35
Tabla 28. Emisión de N ₂ O generada por tipo de PTAR en la Ciudad de México, expresada en tCO ₂ e/habitante/año.	42

Siglas y abreviaturas

AMB	Área Metropolitana de Barcelona
Cap.	Capítulo
CDMX	Ciudad de México
CO₂e	Dióxido de carbono equivalente
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua (México)
DQO	Demanda Química de Oxígeno
FAOS	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GEI	Gases de efecto invernadero
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
MES	Materia en suspensión
OD	Oxígeno Disuelto
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Gases de Efecto Invernadero

Los principales gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera terrestre son básicamente el metano CH₄, el dióxido de carbono CO₂ y el óxido nitroso N₂O, son gases químicamente estables y que están presentes en porcentajes naturales en la atmósfera y poseen la propiedad de dejar pasar la radiación solar y absorber parte de la radiación emitida por la superficie de la tierra, la atmósfera y las nubes. Los GEI han seguido aumentando su concentración en la atmósfera durante los últimos 20 años debido a las actividades antropogénicas, ocasionando un cambio en el balance térmico de la tierra. Este desajuste en el balance térmico, mejor conocido como Cambio Climático, hace que la atmósfera se sobrecaliente al aumentar su capacidad para atrapar el calor que emite la tierra por acción de las nubes y los GEI. Estos gases se mezclan muy bien en la atmósfera, más rápido de lo que se eliminan (IPCC 2014).

Cada uno de los GEI tiene diferente capacidad para absorber la radiación infrarroja emitida por la tierra, lo que le otorga su potencial de calentamiento global (**Tabla 1**). Las emisiones de GEI se contabilizan como emisiones de CO₂e (tCO₂e) utilizando los valores de las ponderaciones basadas en los potenciales de calentamiento global de 100 años que figuran en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (Myhre et al. 2013; IPCC 2014).

Tabla 1. Características de los principales GEI. (Fuente: (Myhre et al. 2013) (IPCC 2014))

Nombre Industrial	Fórmula Química	Potencial de Calentamiento Mundial (tCO ₂ e)
Dióxido de carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	28
Óxido nitroso	N ₂ O	265

De acuerdo al Quinto Informe del IPCC, las emisiones antropogénicas de GEI totales del año 2010 a nivel mundial (Anexo A) corresponden a un 76% a la participación del CO₂, 16% del metano y un 6,2% del total de emisión de los GEI corresponde al óxido nitroso (IPCC 2014).

Las emisiones antropogénicas de GEI han ido en aumento desde 1970 a 2010, pero de 2000 a 2010 se observa un incremento mayor, aun con los sistemas y políticas que se han establecido para la mitigación del cambio climático.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales son consideradas una de las fuentes antropogénicas de GEI, sus emisiones varían de acuerdo a la situación en cada país. En trabajos realizados sobre proyecciones de emisión de PTAR, se demuestra la participación de estos procesos en la emisión de GEI (Lara y Préndez 2003; Kampschreur et al. 2009; Snip 2010).

A continuación, se mencionan los principales GEI y su implicación con el tratamiento de aguas residuales:

➤ Dióxido de Carbono

Es la emisión de GEI de mayor importancia ambiental a nivel mundial, debido a su mayor concentración en la atmósfera (360 mg/L), su elevado poder calorífico y fácil generación provocada por la actividad humana. El CO₂ está en un ciclo continuo en la atmósfera, los océanos y la biosfera terrestre, es por esta razón no se tiene un periodo de vida específico. Dentro de una PTAR la producción de CO₂ se atribuye a dos factores principales: el proceso de tratamiento y el consumo de electricidad (Gupta y Singh 2012). En el proceso anaerobio la DBO₅ de las aguas residuales se incorpora ya sea en biomasa o se transforma en CO₂ y CH₄, los digestores de lodos y la combustión de gas del digestor también son otra fuente de emisión. En el proceso aerobio el CO₂ se produce a través de la descomposición de la materia orgánica. Las directrices del IPCC no consideran la emisión de CO₂ de una PTAR como emisión antropogénica ya que vuelve a la atmósfera de manera natural en equilibrio con su concentración atmosférica, consideración que puede diferir ya que el agua residual contiene detergentes, aceites y grasas de origen sintético (Lara y Préndez 2003; Nolasco 2010).

➤ Metano

Se produce a partir de la degradación biológica de la materia orgánica en condiciones anaerobias a partir del agua o del lodo de purga. Su concentración en la atmósfera es relativamente bajo (1.72 mg/L). La cantidad de metano producida dependerá de la cantidad de materia orgánica degradada y la ausencia de oxígeno disuelto. El gas emitido por una planta de tratamiento de aguas residuales es llamado biogás, y es producido en condiciones óptimas (ausencia total de oxígeno disuelto) en un reactor anaerobio por acción de ciertas bacterias que descomponen la materia orgánica. Este biogás está compuesto por varios gases, en su mayoría metano (55-75%) y dióxido de carbono (25-45%). El metano es un gas inflamable que puede capturarse y utilizarse para generación de energía eléctrica o calorífica. El IPCC asigna al metano un potencial de calentamiento global de 28 veces mayor al del CO₂ (Lara y Préndez 2003; IPCC 2014).

➤ Óxido Nitroso

Se genera como subproducto durante los procesos de nitrificación/desnitrificación (eliminación de nutrientes) en plantas de tratamiento de agua residual (emisión directa) o en el medio receptor natural donde el efluente es descargado (emisión indirecta), ya sea crudo o parcialmente tratado; los flujos de emisión son variables y dependen de los diferentes parámetros de funcionamiento y las condiciones ambientales de cada PTAR. La generación de este gas se da principalmente por los procesos metabólicos de las bacterias autótrofas que oxidan el amoníaco y por bacterias heterótrofas que transforman el nitrato en gas nitrógeno (N₂). El IPCC asigna al N₂O un potencial de calentamiento global de 265 veces mayor al del CO₂, es por ello que incluso pequeñas emisiones de este GEI no son deseables. Las metodologías aprobadas para su cuantificación solo lo consideran en el tratamiento de aguas ganaderas y aplicación del lodo de aguas residuales como fertilizante (IPCC 2014; Nolasco 2010). El óxido nitroso es el tercer GEI más importante y es menos abundante que el CO₂. Este gas es de preocupación ambiental ya que es la mayor fuente de formación de NO estratosférico, que es causante de la destrucción del ozono estratosférico (Farrell et al. 2005; Das 2011).

En los países en desarrollo como lo es México son más frecuentes las emisiones indirectas, ya que sin una eliminación de nutrientes, las aguas tratadas son vertidas directamente a un medio natural, y la emisión de óxido nitroso es mayor (Breña Puyol y Rojas Serna 2015).

1.1.2 Situación GEI en México

Actualmente México forma parte del Acuerdo de París 2016-2020, en donde enfocara esfuerzos para limitar a menos de 2°C el incremento de la temperatura promedio a nivel mundial. Es a través de su estrategia nacional de cambio climático donde se enfoca en temas de desarrollo y promoción en la política nacional, además de concientizar a la población de la importancia y repercusiones que conlleva no frenar el actual cambio climático (SEMARNAT 2015).

Se considera que en 2010, la emisión de CO₂e en México fue de 0.74 GtCO₂e, esto representa el 1.5% de 49 GtCO₂e a nivel mundial reportadas por el IPCC (GT III 2014)(Anexo A); se espera que para el 2020 en México haya una reducción a 0.70 GtCO₂e, resultando en un 5% de reducción a nivel nacional (PROFEPA 2013).

El inventario Nacional de México publicado por la SEMARNAT y el INECC sobre emisiones de gases de efecto invernadero 2013, otorga un 5% del total a la categoría de residuos sólidos y aguas residuales (31 MtCO₂e), aproximadamente un 2% de las emisiones totales de GEI corresponde al tratamiento y eliminación de aguas residuales (INECC 2013).

Una proyección realizada por la US EPA para las emisiones en el año 2030, le asigna un valor del 5% a la emisión global de Non-CO₂ en el sector de tratamiento de aguas (509 MtCO₂e), (US EPA 2016).

En el año 2013 en México la mitigación de GEI por el tratamiento de aguas residuales correspondió a 8.726 MtCO₂e de 105935 l/s de agua residual municipal, una reducción de 0.525 MtCO₂e con respecto al 2012 y con esto se superó en un 9% la meta establecida. Esta reducción de GEI se debe principalmente a la puesta en operación de nuevas PTAR (SEMARNAT y CONAGUA 2014).

1.1.3 Situación GEI en España

El estado Español forma parte del Acuerdo de París en donde se compromete en reducir un 40% las emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2030 respecto a los niveles de 1990 (UNFCCC 2015).

Las emisiones de gases de efecto invernadero estimadas para el año 2014 se situaron en 328.9 millones tCO₂e, lo que supone un incremento en relación al año 1990 del 15%. Las emisiones en 2014 registraron un incremento de 0.45% respecto al 2013 (MINISTERIO DE AGRICULTURA 2014).

La emisión de GEI en España por tratamiento y eliminación de residuos corresponde al 5% del total en el año 2014. De este 5% en específico, se generaron 958.73 ktCO₂e de N₂O (MINISTERIO DE AGRICULTURA 2014).

1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo final de máster es evaluar la emisión de N_2O en plantas de tratamiento de aguas residuales, utilizando métodos empíricos e integrales en dos escenarios distintos, como lo son México y el Área Metropolitana de Barcelona.

Es necesario el desarrollo de objetivos específicos, los cuales se mencionan a continuación:

- Realizar un análisis bibliográfico del estado del conocimiento sobre la emisión de N_2O desde PTAR.
- Seleccionar los métodos de cuantificación para el cálculo de la emisión de N_2O que se puedan aplicar a las condiciones del proceso de tratamiento de aguas residuales en México y el AMB.
- Aplicar los métodos de cálculo para estimar la emisión de óxido nitroso en México y AMB.
- Evaluar y comparar la emisión de N_2O obtenida para México y el Área Metropolitana de Barcelona a partir de las metodologías utilizadas.

2 ESTADO DEL ARTE

En el proceso de recopilación de la información existente se ha realizado una búsqueda de material científico que aborde el tema de emisiones de GEI en plantas de tratamiento de aguas residuales. Para el análisis de metodologías de cuantificación de óxido nitroso solo se han considerado los estudios que comparan emisiones procedentes del tratamiento de aguas residuales. Los artículos revisados se clasifican en artículos sobre la procedencia de emisión del gas, la importancia de cuantificación del N₂O y los métodos existentes para la cuantificación.

2.1 Procedencia de la emisión del N₂O

La emisión de óxido nitroso puede producirse durante varias conversiones del nitrógeno en las plantas de tratamiento de agua residual, como lo son la nitrificación, desnitrificación y por medio de reacciones químicas. Los datos que se registran de emisión a escala laboratorio y a gran escala tienen mucha variación por lo que es necesario establecer medidas de control en las PTAR. Las bacterias nitrificantes contribuyen significativamente en la emisión de este gas (Kampschreur et al. 2009).

Es durante la eliminación de los nutrientes cuando se produce la emisión de N₂O (Kampschreur et al. 2009; Law et al. 2012). Las emisiones directas de la nitrificación y desnitrificación en plantas de tratamiento de aguas residuales son consideradas fuentes menores de emisión, en comparación con las emisiones indirectas que pueden generarse en el efluente descargado en un medio receptor natural (vías fluviales, lagos, ríos o mar) (IPCC 2006).

La nitrificación es un proceso aerobio que transforma el amoníaco y otros compuestos nitrogenados en nitrato. La desnitrificación es un proceso anoxico (ausencia de oxígeno libre) y convierte el nitrato en nitrógeno gas (Nolasco 2010; Thomsen y Lyck 2005), los procesos de desnitrificación se utilizan para remover el nitrógeno del efluente y evitar la eutrofización en el medio receptor natural, o en el caso de usarse para recarga de acuíferos controlar el nivel de nitratos del mismo. El N₂O puede ser un producto intermedio de ambos procesos, pero es más a menudo asociado con la desnitrificación (Gupta y Singh 2012; Hwang, Bang y Zoh 2016).

Las aguas residuales municipales contienen nitrógeno de las proteínas de los alimentos y de otras fuentes, este N puede escapar a la atmósfera en forma de N₂O (Farrell et al. 2005).

Una planta de tratamiento de aguas residuales tiene potencial para nitrificar si tiene las siguientes condiciones (Nolasco 2010):

- Temperatura media superior a 15 °C
- Tiempo de residencia hidráulico mayor a 5 horas
- Tiempo de retención de sólidos mayor a 5 días
- Presencia de amoníaco en el afluente
- Ausencia de tóxicos en cantidades que inhiban la acción de las bacterias nitrificadoras
- pH mayor a 6.5 y menor a 8.5

Por medio del análisis de datos que permite la literatura se tienen identificados tres parámetros de operación que conducen a la emisión de N₂O en PTAR: la baja concentración de OD en las etapas de nitrificación/desnitrificación, el aumento de concentración de nitritos en ambas etapas y la baja relación de DQO/N en la etapa de desnitrificación (Kampschreur et al. 2009).

Los procesos de transformación del N microbiano en una planta de tratamiento de aguas residuales son fundamentalmente los mismos que en otros entornos, como los hábitats marinos, los de agua dulce y el suelo. Sin embargo, a diferencia de la mayoría de los ambientes naturales, las PTAR son sistemas diseñados para lograr la conversión de altas tasas de nitrógeno (Law et al. 2012).

Durante el tratamiento y disposición de los lodos también se genera una emisión de N₂O, a partir del contenido de N remanente y el tipo de lodo producido. El lodo digerido anaeróbicamente contiene un bajo porcentaje de N (3 a 7%), pero podría ser oxidado nuevamente, cuando el lodo sea dispuesto en canchas de secado (durante este proceso se induce la aireación para mejorar el secado solar). Así mismo, la fase desnitrificante podría activarse en las zonas que permanecieran con menor aireación, creando condiciones anóxicas. La misma situación podría ocurrir posteriormente durante el manejo de los lodos en el relleno sanitario, en especial durante las épocas de lluvia que acidifican el pH, creando condiciones ambientales más favorables para la desnitrificación (Lara y Préndez 2003). Para el IPCC esta emisión desde los lodos es considerada poco probable y por lo tanto es despreciable (IPCC 2006).

2.2 Importancia de cuantificación y metodologías aplicables al N₂O

La emisión de óxido nitroso de las PTAR es relativamente pequeña, es un 3% de la emisión de N₂O antropogénico total estimado, pero es un factor significativo del 26% de la huella de GEI de la cadena total de agua. La concentración de óxido nitroso ha ido en aumento de 270 ± 7 ppb en 1750 a $324.2 \pm 0,1$ ppb en 2001, con un aumento de 5 ppb desde el 2005 (WG1 2013). Según literatura los datos de emisión muestran una gran variación entre los resultados de emisión de N₂O a escala laboratorio (0-95% de la carga de N) y a gran escala (0-15% de la carga de N) (Kampschreur et al. 2009). Se espera que las emisiones globales de N₂O en aguas residuales crezcan aproximadamente un 13% entre 2005 y 2020, al aumentar la cobertura de tratamiento de aguas residuales a nivel mundial (Gupta y Singh 2012).

Debido al alto costo que genera la eliminación de nutrientes (N y P) en el tratamiento de aguas residuales, en los países en desarrollo no es aplicado por las PTAR (Nolasco 2010). El grado de tratamiento de las aguas residuales en los países en desarrollo es de parámetros de calidad diferentes al de los países desarrollados.

Conociendo la capacidad de calentamiento que tiene el N₂O y las implicaciones que conlleva (deterioro de la capa de ozono, incremento en el calentamiento global), es necesario establecer métodos con información específica para cada región, como: el rendimiento, población servida, la carga orgánica per cápita y el tipo de tratamiento para tener una correcta medición de este GEI y proponer sistemas de reducción (Farrell et al. 2005; Gupta y Singh 2012; Heffernan, Blanc y Spanjers 2012; PROFEPA 2013).

En la literatura se pueden encontrar diferentes modelos que tratan de describir los mecanismos relacionados con GEI que se encuentran involucrados en el tratamiento de aguas residuales. Estos modelos se subdividen en 3 grupos: Modelos Empíricos (proporcionan un orden de magnitud de la producción de GEI), Modelos de procesos integrales simples para tratamiento de aguas residuales y biosólidos, y en Modelos Mecánicos (descripción dinámica de la producción de ciertos GEI), (Corominas et al. 2010).

Algunos modelos matemáticos se utilizan para estimar la emisión de gases de efecto invernadero en el tratamiento de aguas residuales municipales, donde se toman datos propios de la misma planta de tratamiento donde se realiza el análisis, y algunos datos por defecto que recomienda la literatura. En consideración al tipo de tratamiento que se aplique y la configuración de la planta, dependerá el grado de emisión de GEI. (Heffernan, Blanc y Spanjers 2012) midieron la emisión de CO₂ y CH₄ únicamente, ya que en el caso de un tratamiento avanzado de aguas residuales donde el diseño y la operación sean correctos, la emisión de N₂O es casi nula.

Otros estudios se centran principalmente en la emisión de metano y óxido nitroso de las plantas de tratamiento de agua residual, ya que el carbono que se presenta en el tratamiento es de origen biogénico (ciclo corto o de fuentes naturales) y vuelve a la atmosfera como CO₂, no representa ningún flujo neto al sistema (IPCC 2006). Para la cuantificación de las emisiones de GEI es empleado el Greenhouse Gas Protocol y las Directrices de la IPCC, ambos métodos sirven como principal fuente de conocimiento para la contabilidad y presentación de informes de GEI (Gupta y Singh 2012).

Las principales metodologías utilizadas a nivel mundial para el cálculo de emisión de N₂O son: la metodología propuesta por el IPCC, la metodología de la USEPA y la metodología de Doorn; las demás metodologías encontradas en la literatura y artículos se basan en estas, aplicándole modificaciones específicas para cada región y planta a analizar (Epa y Change Division 1990; Doorn y Liles 1999; IPCC 2006).

La Comisión Europea informo que el 3% de las cifras que se registran de emisiones de N₂O del mundo provienen de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Crippa et al. 2016). La temperatura es un factor importante en la liberación de compuestos gaseosos, ya que un estudio realizado en dos ciudades en España con climas diferentes y comparando resultados con verano e invierno, demuestran que la emisión de N₂O está relacionada a la temperatura. El muestreo del gas se realizó de manera mecánica en un punto específico del proceso (entrada a la PTAR), pero se recomienda que el muestreo no solo se realice en un solo punto fijo, para así conocer cómo afectan las variaciones de OD (Eijo-Río et al. 2015).

Según literatura consultada sobre la emisión de N₂O, dependiendo el grado avanzado de tratamiento y las estrategias de operación será la relevancia de medir o no la emisión de este gas (Farrell et al. 2005; IPCC 2006; Corominas et al. 2010; Gupta y Singh 2012; Heffernan, Blanc y Spanjers 2012). Foley (2009) concluyo que las plantas con alto nivel de remoción de nitrógeno emiten menos N₂O en comparación con aquellas plantas que no nitrifican o tienen bajos niveles de remoción de nitrógeno.

En el informe realizado por (Gupta y Singh 2012) se presenta la metodología a seguir para realizar un inventario de N₂O en Noida, India (caso de estudio), en él se estima el nitrógeno en el efluente y el factor de emisión de emisiones indirectas, utilizando la metodología propuesta por la IPCC (**Tabla 3**).

El IPCC propone un método para el cálculo de la emisión de N₂O provenientes de las aguas residuales, donde considera dos tipos de emisiones: las emisiones directas provenientes de plantas de tratamiento o como emisiones indirectas precedentes de las aguas residuales después de la eliminación de los efluentes en vías naturales. Las emisiones directas derivadas de la nitrificación y desnitrificación en instalaciones de tratamiento de aguas servidas pueden considerarse fuentes menores que las de los efluentes (IPCC 2006). El *método del IPCC* es una

metodología aceptada internacionalmente, y además es un modelo empírico que servirá para hacer el inventario y conocer el orden de magnitud de la producción de este GEI de manera general. La metodología del IPCC nos servirá para realizar una comparación de emisiones directas e indirectas

❖ Método IPCC – Emisión Directa

El IPCC considera que las emisiones procedentes de plantas centralizadas avanzadas de tratamiento de aguas residuales son mucho menores que las emisiones desde los efluentes, y que es probable este valor solo le interese a los países donde existen tratamientos avanzados de aguas residuales con etapas controladas de nitrificación y desnitrificación. El método para calcular emisiones de N₂O provenientes de PTAR en inventarios nacionales, se presenta en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Cuantificación N₂O por método IPCC – Emisión Directa. (Fuente: (IPCC 2006))

EMISIONES N ₂ O PROVENIENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO CENTRALIZADO DE LAS AGUAS RESIDUALES	
$N_{2O}PLANTAS = P \cdot T_{PLANTA} \cdot F_{IND-COM} \cdot EF_{PLANTA}$	
Donde:	
N₂O_{PLANTAS}=	Emisiones de N ₂ O de plantas durante el año del inventario, kg de N ₂ O
P=	Población Humana
T_{PLANTA}=	Grado de utilización de las plantas de tratamiento de agua residual centralizadas modernas, %
F_{IND-COM}=	Fracción de las proteínas industriales y comerciales co-eliminadas (por defecto=1.25, basado en datos del Metcalf & Eddy (2003) y en dictamen de expertos)
EF_{PLANTA}=	Factor de emisión, 3.2 g N ₂ O/persona/año

❖ Método IPCC – Emisión Indirecta

El IPCC (Directrices del IPCC 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero) propone un método para el cálculo de emisiones indirectas de N₂O derivadas de efluentes de tratamiento de aguas residuales que se eliminan en medio acuáticos (Vol. 5: Desechos, Cap. 6: Tratamiento y eliminación de aguas residuales, IPCC, 2006). La metodología para emisión indirecta de N₂O de aguas residuales es similar a la metodología ocupada para la emisión de N₂O de suelos gestionados del Volumen 4, IPCC 2006. Esta metodología de cuantificación calcula la cantidad total anual de N en el efluente, considerando el consumo per cápita anual de proteínas de la población humana que tiene el servicio de dicha PTAR (**Tabla 3**). Para su aplicación se toman valores por defecto que proporciona la IPCC (IPCC 2006).

Tabla 3. Cuantificación N₂O por método IPCC – Emisión Indirecta. (Fuente: (IPCC 2006))

NITRÓGENO TOTAL EN LOS EFLUENTES	
$Emisiones\ de\ N_{2}O = N_{EFLUENTE} \cdot EF_{EFLUENTE} \cdot 44/28$	
Donde:	
Emisiones de N₂O=	Emisiones de N ₂ O durante el año del inventario, kg N ₂ O/año
N_{EFLUENTE}=	N en el efluente eliminado en medios acuáticos, kg N/año

E_{EFLUENTE} =	Factor de emisión para emisiones de N ₂ O proveniente de la eliminación de aguas residuales, kg N ₂ O-N/kg N. Por defecto 0.005
FACTOR 44/28	Conversión de kg N ₂ O-N en kg N ₂ O

$$N_{EFLUENTE} = (P \cdot \text{Proteína} \cdot F_{NPR} \cdot F_{NON-CON} \cdot F_{IND-COM}) - N_{LODO}$$

Donde:

N_{EFLUENTE} =	Cantidad anual total de N en efluente de aguas residuales, kg N/año
P =	Población humana que abarca el tratamiento de la PTAR
Proteína =	Consumo per cápita anual de proteínas, kg/persona/año
F_{NPR} =	Fracción de N en las proteínas, por defecto= 0,16 kg N/kg Proteína
F_{NON-CON} =	Factor de las Proteínas no consumidas añadidas a las aguas residuales
F_{IND-COM} =	Factor para Proteínas industriales y comerciales co-eliminadas en los sistemas de alcantarillado (1.1 para países sin eliminación de basuras, 1.4 con eliminación)
N_{LODO} =	N separado con el lodo residual (por defecto=0), kg N/año

Se realizan estudios en sitios puntuales, como uno realizado para el cálculo de la emisión de GEI en aguas residuales de la zona Metropolitana de Santiago de Chile (Lara y Préndez 2003), se plantean 4 métodos para la cuantificación de N₂O: el método de Doorn y Liles (Doorn y Liles 1999), método IPCC (Tabla 2 y Tabla 3), método USEPA (Tabla 6) y por ultimo propone un método propio para el cálculo de emisión desde el lodo tratado (**Tabla 5**):

❖ Método Doorn y Liles

El *método de Doorn y Liles* es una metodología integral reconocida internacionalmente, ya que ha servido como base para la creación de otras metodologías; entre ellas la metodología del IPCC y EPA. El modelo establecido por Doorn y Liles (1999) para la estimación de emisión de óxido nitroso que proviene del tratamiento de aguas residuales (**Tabla 4**) posibilita ingresar datos específicos por PTAR como la DQO per cápita y el número de población de tratamiento (Doorn y Liles 1999).

Tabla 4. Cuantificación N₂O por método Doorn y Liles. (Fuente: (Doorn y Liles 1999))

EMISIÓN DE N₂O POR AGUAS RESIDUALES TRATADAS	
Emisiones de N₂O = F_E Σ (P • 365 • DBO_P • F_{DBO} / 100) • 10⁻¹²	
Donde:	
Emisiones de N₂O =	Emisiones de N ₂ O durante un año de aguas residuales tratadas, Tg/año
F_E =	Factor de emisión, g N ₂ O/g DBO _r
P =	Población servida con el tratamiento de agua residual
DBO_P =	Carga orgánica per cápita, expresada como carga de DBO anual, g DBO/habitante/día
F_{DBO} =	Fracción de DBO fácilmente degradada
FACTOR 10⁻¹²	Conversión a Tg/año

❖ Método Lara y Préndez

Este método propuesto por Lara y Préndez permite estimar la emisión desde el lodo tratado y dispuesto en la planta de tratamiento, de acuerdo al tipo de lodo y a la tecnología que se emplea para su tratamiento, a partir del N remanente del lodo; utiliza el mismo factor de emisión sugerido por el IPCC.

(Lara y Préndez 2003).

Tabla 5. Cuantificación N₂O por método Lara y Préndez. (Fuente: (Lara y Préndez 2003))

EMISIÓN DE N ₂ O DESDE EL LODO TRATADO Y DISPUESTO	
$N_2O = L_p \cdot N_L \cdot FEN \cdot F_{conv} \cdot 10^{-6}$	
Donde:	
N₂O=	Emisión anual de N ₂ O desde el lodo tratado y dispuesto, Tg/año
L_p=	Lodo producido por planta de tratamiento, por tipo de tecnología empleada, Ton/año
N_L=	Contenido de N en el lodo producido por tipo de tratamiento
FEN=	Factor de emisión directo de N ₂ O, kg N ₂ O-N/kg N en lodo producido
F_{conv}=	Factor de conversión, relación molecular entre N ₂ O y N ₂ en condiciones estándar (44/28)
FACTOR 10⁻⁶	Conversión a Tg/año

La Universidad de Carolina, mediante un informe muestra su preocupación ambiental por la emisión de N₂O ya que destruye eficazmente la capa de ozono en la estratosfera. El estado de Carolina aplica el método de la IPCC en su inventario de GEI en 2002, pero incluye correcciones significativas y mejoras de la metodología de la EPA para la cuantificación de N₂O. Para el cálculo toma valores propios de la situación del estado y no los valores por defecto propuestos por la IPCC. Considera como imprecisa la metodología para el cálculo propuesta por la IPCC, es por ello que sugiere aplicar esfuerzos para la mejora de la metodología y propone oportunidades para un mayor refinamiento (Farrell et al. 2005).

❖ Método US EPA

El método sugerido por la US EPA es una modificación de la metodología propuesta por la IPCC (2006) para estimar la emisión de N₂O del agua residual tratada específica en los Estados Unidos de América; estima la emisión desde la conversión en el efluente, los procesos de Nitrificación/Desnitrificación, y el tratamiento convencional sin procesos de Nitrificación/Desnitrificación. La US EPA incluye nuevos factores de emisión de g N₂O per cápita por año de acuerdo al tipo de tratamiento que se aplique que en PTAR, estos factores se detallan en la **Tabla 6** (USEPA 2007; CH2MHILL 2008).

Tabla 6. Cuantificación N₂O por método US EPA. (Fuente: (CH2MHILL 2008))

EMISIÓN DE N ₂ O POR AGUAS RESIDUALES
$N_2O_{TOTAL} = N_2O_{PLANT} + N_2O_{EFFLUENT}$
$N_2O_{PLANT} = N_2O_{NIT/DESN} + N_2O_{WOUT\ NIT/DESN}$
$N_2O_{NIT/DESN} = [(US_{POPND}) \cdot EF_2] \cdot 1/10^9$
$N_2O_{WOUT\ NIT/DESN} = \{[(US_{POP} \cdot WWTP) - US_{POPND}] \cdot EF_1\} \cdot 1/10^9$

$$N_2O_{EFLUENT} = \{[(US_{POP} \cdot Protein \cdot F_{NPR} \cdot F_{NON-CON}) - N_{sludge}] \cdot EF_3 \cdot 44/28\} \cdot 1/10^6$$

Donde:

N₂O_{TOTAL} =	Emisiones anuales de N ₂ O
N₂O_{PLANT} =	Emisiones de N ₂ O desde plantas centralizadas de tratamiento de aguas residuales
N₂O_{NIT/DESN} =	Emisiones de N ₂ O desde plantas centralizadas de tratamiento de aguas residuales con Nitrificación/Desnitrificación
N₂O_{WOUT NIT/DESN} =	Emisiones de N ₂ O desde plantas centralizadas de tratamiento de aguas residuales sin Nitrificación/Desnitrificación
N₂O_{EFLUENT} =	Emisiones de N ₂ O desde efluentes de aguas residuales descargadas en ambientes acuáticos
US_{POP} =	Número de población relacionada con el tratamiento
US_{POPND} =	Población que es servida con desnitrificación biológica
WWTP =	Fracción de la población utilizando las EDAR
EF₁ =	Factor de emisión (3.2 g N ₂ O/persona año)
EF₂ =	Factor de emisión (7 g N ₂ O/persona año)
Protein =	Consumo anual per cápita de proteína
F_{NPR} =	Fracción de N en proteínas, por defecto= 0.16 (kg N/kg proteína)
F_{NON-CON} =	Factor para las proteínas no consumidas adheridas al agua residual
F_{IND-COM} =	Factor para la proteína industrial y comercial en el sistema de alcantarillado
N_{sludge} =	N removido del lodo, kg N/año
EF₃ =	Factor de emisión (0.005 Kg N ₂ O-N/Kg aguas residuales-N producido)
FACTOR (44/28)	Relación de peso molecular de N ₂ O a N ₂

En la actualidad se desarrollan modelos más precisos para medir emisiones dentro y fuera de la PTAR de gases de efecto invernadero generadas a partir de plantas de tratamiento de aguas residuales. En este modelo (**Tabla 7**) que se presenta a continuación, los resultados experimentales arrojaron que dentro de la PTAR las emisiones se generaron por reacciones bioquímicas, mientras que las emisiones fuera de la planta están relacionadas con el consumo de electricidad, la producción química y el transporte, por lo tanto las emisiones de N₂O fuera de la planta quedan descartadas al ser un tratamiento avanzado de aguas residuales y solo se cuantifica la emisión de este gas dentro de la PTAR. Para el cálculo toman en cuenta los valores de DBO y N total que son medidos de manera constante y controlada. Los autores de este modelo (Kyung et al. 2015) consideran que la metodología que proponen es adecuada para estimar con precisión las emisiones de gases de efecto invernadero de las PTAR, según los resultados obtenidos y su comparación con estudios previos realizados sobre el tema (Kyung et al. 2015).

Calculo de emisiones GEI dentro de la PTAR:

Tabla 7. Cuantificación GEI por método Kyung. (Fuente: (Kyung et al. 2015))

EMISIÓN DE N₂O DESDE EL LODO TRATADO Y DISPUESTO

$$P_{in-situ} = \sum (CO_2, \text{ unit process}, i + GWP_{CH_4} \cdot CH_4, \text{ unit process}, i + GWP_{N_2O} \cdot N_2O_{\text{unit process}, i})$$

Donde:

$$M_{BOD,i} = (\Delta BOD_i \cdot Q_{flow}) \cdot 10^{-3}$$

$$M_{TN,i} = (\Delta TN_i \cdot Q_{flow}) \cdot 10^{-3}$$

$$CO_{2, \text{ unit process}, i} = EF_{CO_2, i} \cdot M_{BOD, i}$$

$$CH_{4, \text{ unit process}, i} = EF_{CH_4, i} \cdot M_{BOD, i}$$

$$N_2O_{\text{unit process}, i} = EF_{N_2O, i} \cdot M_{TN, i}$$

Otros estudios sugieren que falta mayor comprensión de las reacciones fundamentales responsables de la producción de N₂O en los sistemas de tratamiento de aguas residuales y las condiciones que estimulan su ocurrencia, y que además se lograra una reducción de esta emisión a través de mejoras en el diseño de las plantas y la operación en un futuro próximo. (Law et al. 2012) se centra en la emisión de N₂O dentro del proceso, para el análisis de emisión de N₂O en fase gas fue necesario tomar muestras continuas en línea del gas dentro del tanque de lodos activados, mediante jeringas de nylon y una bomba de aire; las muestras se analizaron a través de un cromatógrafo de gases con un detector de captura de electrones. En el análisis en fase líquido del gas, se tomaron muestras fuera de línea y se llevaron a una botella al vacío hasta que alcanzara el equilibrio líquido-Gas para realizar la medición; la concentración total de la muestra se obtiene al dividir la cantidad total de N₂O en ambas fases por el volumen total del líquido. Otras mediciones a tener en cuenta para el desarrollo del modelo fueron: el pH, OD, temperatura, sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos volátiles (Law et al. 2012).

Un informe realizado por el Grupo contra el Cambio Climático provocado por las aguas residuales de California, presenta diferentes metodologías para el cálculo de la emisión de N₂O, como son los métodos de la IPCC, US EPA y el método de la CEC (Comisión de Energía de California). A continuación se detalla el método de la CEC (Tabla 8), (CH2MHILL 2008).

❖ Método CEC

El método propuesto por la CEC para la estimación de las emisiones de N₂O es una versión simplificada del método de la USEPA (2007). Este método supone que todas las emisiones de óxido nitroso son el resultado de las aguas residuales descargadas en el medio natural, por lo tanto no tiene en cuenta las emisiones procedentes de la Nitrificación/Desnitrificación. Considera un valor de 0.01 kg N₂O-N/kg N de factor de conversión de los efluentes, un valor mayor que el que considera el IPCC y la USEPA (0.005 kg N₂O-N/kg N). La emisión de N₂O es calculada en base a los factores que se presentan a continuación (Tabla 8), (CH2MHILL 2008).

Tabla 8. Cuantificación N₂O por método CEC. (Fuente: (CH2MHILL 2008))

Factor	Valor
Población	Número de personas
Consumo de Proteínas per cápita	42.1 kg/persona año
Fracción de N en la Proteína	0.16 kg N/kg Proteína
Factor de emisión por N ₂ O desde aguas residuales descargadas	0.01 kg N ₂ O-N/kg N

El Instituto Nacional de Investigaciones Ambientales de Dinamarca también ha enfocado esfuerzos en la cuantificación de GEI desde PTAR. Aplica su propia metodología para el cálculo de N₂O, tomando como base la metodología propuesta por la IPCC, pero incorporando datos

propios del país, como el porcentaje de población que se encuentra conectado al sistema de alcantarillado municipal y la población que no lo está, además de que considera el porcentaje de carga industrial que llega al efluente (Thomsen y Lyck 2005).

❖ Método Dinamarca – Emisión Directa

El Instituto de Dinamarca considera que las emisiones directas que se generan de los procesos de nitrificación y desnitrificación durante el tratamiento biológico de aguas residuales también debe ser cuantificado; toma en consideración el porcentaje de población que está conectada al sistema de alcantarillado municipal. La emisión directa desde plantas de tratamiento de aguas residuales de Dinamarca es calculada de la siguiente manera (Tabla 9).

Tabla 9. Cuantificación N₂O por método Dinamarca – Emisión Directa. (Fuente: (Thomsen y Lyck 2005))

EMISIONES N ₂ O PROVENIENTES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO AVANZADO CENTRALIZADO DE LAS AGUAS RESIDUALES	
$E_{N_2O, WWTP, direct} = N_{pop} \cdot F_{connected} \cdot EF_{N_2O, WWTP, direct}$	
Donde:	
$N_{pop} =$	Número de población Danesa
$F_{connected} =$	Fracción de población Danesa conectada al sistema de alcantarillado municipal (0.9)
$EF_{N_2O, WWTP, direct} =$	Factor de emisión de acuerdo a la capacidad de la PTAR

❖ Método Dinamarca – Emisión Indirecta

La fórmula usada en Dinamarca para las emisiones indirectas, está basada en el porcentaje de población que no está conectada al sistema de alcantarillado municipal, esta ecuación se presenta a continuación (Tabla 10).

Tabla 10. Cuantificación N₂O por método Dinamarca – Emisión Indirecta. (Fuente: (Thomsen y Lyck 2005))

EMISIONES N ₂ O PROVENIENTES DE LOS EFLUENTES DE LAS AGUAS RESIDUALES	
$E_{N_2O, WWTP, effluent} = [(P \cdot F_N \cdot N_{pop} \cdot F_{nc} \cdot F) + (D_{N, WWTP} + (D_{N, WWTP} \cdot 0.1))] \cdot EF_{N_2O, WWTP, effluent} \cdot \frac{MN_{2O}}{2 \cdot MN}$	
Donde:	
$P =$	Consumo anual per cápita de Proteínas
$F_N =$	Fracción de N en la proteína (0.16)
$N_{pop} =$	Número de población Danesa
$F_{nc} =$	Fracción de la población Danesa no conectada al sistema de alcantarillado municipal (0.1)
$F =$	Fracción no consumida de proteína en aguas residuales domesticas
$D_{N, WWTP} =$	Carga de N descargado al efluente de aguas residuales (10% añadido a la cuenta de datos no incluidos en la estadística)
$EF_{N_2O, WWTP, effluent} =$	Factor de emisión, por defecto el propuesto por la IPCC (0.01 kg N ₂ O-N/kg N)
$M_{N_2O}/M_N =$	Factor de conversión de kg N ₂ O-N a kg N ₂ O (44/28)

La Universidad de Windsor en Ontario, Canadá, realiza un estudio de la emisión de GEI en las plantas de tratamiento de agua residual de la zona de Windsor; considera la emisión dentro (durante del tratamiento) y fuera del proceso (efluente de agua residual); para esto toma en consideración la metodología de la IPCC (2006), EPA (1997) y Scheehle y Doorn (2001), pero le incluye datos propios de la población y la zona de estudio. La metodología aplicada se detalla a continuación (**Tabla 11**). (Das 2011).

Tabla 11. Cuantificación N₂O por método Windsor – Emisión Directa e Indirecta. (Fuente: (Das 2011))

EMISIÓN DE NITRÓGENO DESDE AGUAS RESIDUALES	
Emisiones de N ₂ O = E _{N2O, Direct} • E _{N2O, Indirect}	
<i>Donde:</i>	
Emisiones de N ₂ O=	Emisiones de N ₂ O durante el año del inventario, kg N ₂ O/año
E _{N2O, Direct} =	Emisiones directas durante el proceso
E _{N2O, Indirect} =	Emisiones indirectas desde el efluente de agua residual
(EPA 1997)	
$E_{N2O, Direct} = W_{pop} \bullet EF_1 \bullet CF$	
<i>Donde:</i>	
E _{N2O, Direct} =	Emisión directa desde el proceso de tratamiento de agua residual, kg N ₂ O/año
W _{pop} =	Población humana que abarca el tratamiento de la PTAR
EF ₁ =	Factor de emisión, 3.2 g N ₂ O/persona/año
CF=	Factor de corrección de vertidos industriales, 1.14
(Scheehle y Doorn 2001)	
$E_{N2O, Indirect} = [(P \bullet NP_{frac} \bullet F \bullet W_{pop}) - Nit_{ww} - Nit_{sludge}] \bullet EF_2 \bullet 44/28$	
<i>Donde:</i>	
E _{N2O, Indirect} =	Emisión indirecta desde el efluente de agua residual, kg N ₂ O/año
P=	Consumo per cápita de proteína, kg/persona año
NP _{frac} =	Fracción de N en proteína, 0.16 kg N/kg proteína (IPCC 1996)
F=	Factor de no consumo de proteínas en aguas residuales domésticas, 1.14
Nit _{ww} =	Cantidad de N removido por proceso de tratamiento en agua residual doméstica, (W _{pop} • EF ₁ • CF • 28/44)
Nit _{sludge} =	Cantidad de N en lodo que no está en contacto con ambiente acuático (0.12 • Pbiomass)
EF ₂ =	Factor de emisión, 0.01 kg N ₂ O-N/kg N en agua residual producido (IPCC 1996)
FACTOR 44/48	Factor de conversión de N ₂ O a N ₂

Existen dos parámetros comunes para monitorear el Nitrógeno, el TKN y TN. El método de cuantificación TKN (Nitrógeno Total Kjeldahl), es la suma de nitrógeno orgánico y amoníaco libre (NH_4^+ y NH_3) en los residuos o las aguas residuales; el método TN es la suma del TKN mas NO_3^- y NO_2^- . El TN no es un método aprobado por la EPA (Rti 2010). (Hwang, Bang y Zoh 2016) cuantifica la emisión de N_2O en la PTAR de Jungryang en Corea del Sur a partir del nitrógeno total (TN),

empleando un cromatógrafo de gases con detector de captura de electrones y columnas de acero inoxidable con condiciones de funcionamiento estrictas. Las emisiones mayores de N₂O se produjeron en el tanque de aireación.

Algunos autores también difieren de las metodologías de la US EPA (2010) y la IPCC (2006), ya que consideran no toman en cuenta los diferentes procesos de tratamiento, las condiciones y la configuración, la variabilidad espacial y diurna en las emisiones de N₂O (Rti 2010). Un grupo de investigadores de Estados Unidos hacen referencia a un método de Chandran (2010) para la estimación de N₂O en procesos aerobios y anaerobios de tratamiento de aguas residuales, utilizando el valor medio de TKN. La metodología se presenta en la **Tabla 12** (Rti 2010).

Tabla 12. Cuantificación N₂O por método Chandran. (Fuente: (Rti 2010))

EMISIÓN DE N ₂ O POR PROCESOS AEROBIOS Y ANAEROBIOS	
$N_{2O_{WWTP}} = Q_i \cdot TKN_i \cdot EF_{N_{2O}} \cdot 44/28 \cdot 10^{-6}$	
Donde:	
$N_{2O_{WWTP}}$ =	Emisiones de N ₂ O generadas desde procesos de tratamiento de agua residual, Mg N ₂ O/hora
Q_i =	Caudal afluente de las aguas residuales (m ³ /hora)
TKN_i =	Cantidad de TKN en el afluente (mg/L=g/m ³)
$EF_{N_{2O}}$ =	Factor de emisión de N ₂ O, 0.005 g N emitido como N ₂ O/g TKN (Chandran, 2010)
44/28	Conversión de peso molecular, g N ₂ O-N a g N ₂ O
10⁻⁶	Factor de conversión de unidades, Mg/g

Algunas estrategias para minimizar la emisión de N₂O desde el proceso de tratamiento de aguas residuales son: evitar los cambios de pH transitorios en condiciones aerobias mediante la alimentación lenta, el aumento de tiempos de retención para aumentar la concentración de biomasa y mayor OD, además de un mejor diseño y control de operación de la PTAR, entre otros (Law et al. 2012).

Actualmente los estudios de cuantificación se basan en simulaciones de cuantificación de GEI donde se comparan diferentes tipos de configuración de plantas de aguas residuales, considerando únicamente la emisión directa que se origina de la planta de tratamiento de aguas residuales. Se utiliza el método de Bridle (2008) y el BSM2G. Para la modelización basado en el método de Bridle se tienen en cuenta: el flujo y concentración, las condiciones de operación, las variables del proceso, la energía y el consumo químico; además para el cálculo de N₂O se monitorea el proceso del tratamiento secundario. El método BSM2G considera los procesos de Nitrificación y Desnitrificación como parte del proceso. Al comparar los resultados que arrojan ambos métodos, los resultados presentan variaciones grandes en las emisiones de N₂O, por lo que se recomienda hacer las mediciones conforme al enfoque del modelo seleccionado en toda la planta y no solo en ciertos procesos (Corominas et al. 2010; Snip 2010; Corominas et al. 2012; Rodriguez-Garcia et al. 2012).

Con algunos estudios realizados se ha demostrado que implementando controladores es posible reducir las emisiones de GEI, mejorar la calidad del efluente y reducir los costos de operación; además que con el uso de simuladores es posible ver como los estándares del efluente, las prestaciones económicas y las causas de emisiones de GEI están plenamente ligados y de esta

manera tomar las mejores decisiones para la selección de la mejor alternativa a implantar en el proceso de tratamiento de aguas residuales (Corominas et al. 2010). Por lo tanto al mejorar el proceso del tratamiento de aguas residuales y las condiciones de operación del mismo, esto origina una mejor calidad del efluente y una disminución en la emisión de GEI.

3 CASO DE ESTUDIO

3.1 Situación GEI en México

El Plan Nacional de Desarrollo de México establece como compromiso voluntario (México, país no-anexo I del Protocolo de Kioto) la reducción de emisiones de GEI al incluirlo como tema prioritario en su estrategia de fortalecimiento en la política nacional de cambio climático; enfocándose en el desarrollo y promoción de instrumentos de política para la prevención y mitigación de emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero a la atmósfera y el incremento de la resiliencia de la población y de los ecosistemas ante los efectos del cambio climático (PROFEPA 2013). En la **Tabla 13** se presenta el porcentaje de emisión de los gases de efecto invernadero en México, de acuerdo al Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 2013, realizado por el INECC y la SEMARNAT; se puede apreciar que los valores de cada gas son muy cercanos a los valores considerados por la IPCC en el RRP. 1-Anexo 1, (INECC 2013).

Tabla 13. Emisión Neta de GEI en México 2013. (Fuente: INEEC-SEMARNAT, actualización 2013)

Nombre Industrial	Fórmula Química	Emisión Neta 2013
Dióxido de Carbono	CO ₂	66.4%
Metano	CH ₄	25.6%
Óxido Nitroso	N ₂ O	6.1%
Otros	HFC, PFC, SF	1.9%

De acuerdo al informe “México en el Mundo 2014” realizado por la INEGI, las emisiones de metano y óxido nitroso originadas por fuentes antropogénicas se presentan en la **Tabla 14** expresadas en MtCO₂e (INEGI 2015a).

Tabla 14. Emisión GEI en México 2014 (Fuente: INEGI 2015)

EMISIÓN GEI POR FUENTES ANTROPOGENICAS, KtCO ₂ e	
Metano	194 200 x 10 ³
Óxido Nitroso	28 800 x 10 ³

El inventario Nacional de México publicado por la SEMARNAT y el INECC sobre emisiones de gases de efecto invernadero 2013 (**Figura 1**) otorga un 5% del total a la categoría de residuos sólidos y aguas residuales (31 MtCO₂e), aproximadamente un 2% de las emisiones totales de GEI corresponde al tratamiento y eliminación de aguas residuales (INECC 2013).

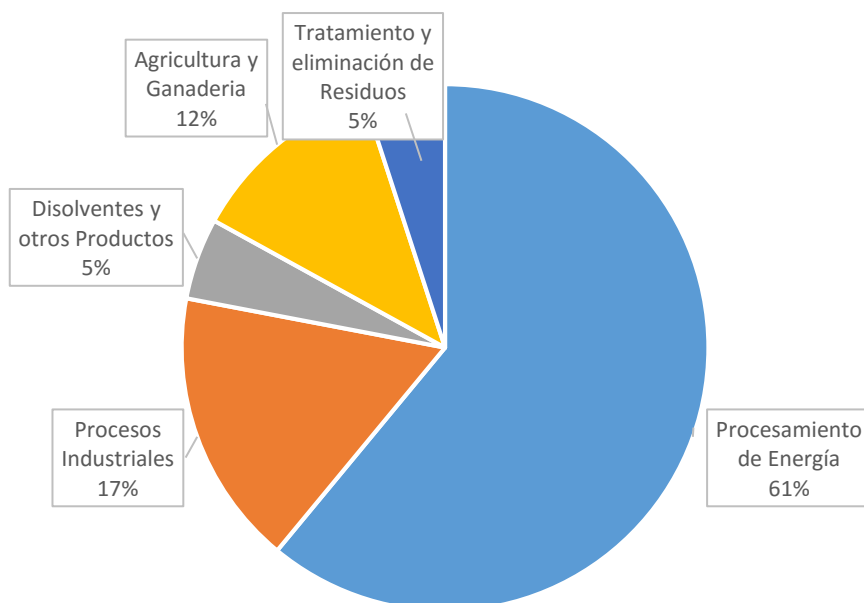


Figura 1. Inventario Nacional de Emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero México 2013. (Fuente: INECC)

Una proyección realizada por la US EPA para las emisiones en el año 2030, le asigna un valor del 5% a la emisión global de Non-CO₂ en el sector de tratamiento de aguas (509 MtCO₂e) (US EPA 2016).

En el año 2012 en México la reducción de GEI por el tratamiento de aguas residuales correspondió a 8.201 MtCO₂e de 99750 l/s de agua residual municipal; a partir de este valor se establecieron metas anuales, y para el 2013 se logró mitigar 8.726 MtCO₂e con el tratamiento de 105935 l/s de agua tratada, una reducción de 0.525 MtCO₂e con respecto al 2012 y con esto se superó en un 9% la meta establecida, estas son cifras oficiales reportadas por la CONAGUA (SEMARNAT y CONAGUA 2014). Esta reducción de GEI se debe principalmente a la puesta en operación de nuevas PTAR. En la **Tabla 15** se presentan las metas de reducción de GEI en México (Datos oficiales reportados por SEMARNAT y CONAGUA 2014).

Tabla 15. Metas de reducción de GEI en México (Fuente: (SEMARNAT y CONAGUA 2014))

Año	Meta anual parcial, KtCO ₂ e	Meta anual acumulada, KtCO ₂ e
2013	481	481
2014	443	924
2015	485	1 409
2016	443	1 852
2017	493	2 345
2018	535	2 880

3.2 Situación del Estado Actual del Tratamiento de Aguas Residuales en Ciudad de México y Ciudad de Aguascalientes

El volumen de aguas residuales depende de la situación de cada país, ya que está estrechamente relacionado con la disponibilidad, la infraestructura sanitaria y la concientización de la población respecto al agotamiento del recurso hídrico. En el caso de México, no toda el agua residual recibe un tratamiento antes de verse al medio, lo que ocasiona una contaminación del suelo y aguas superficiales que genera un grave riesgo a la salud humana y medio ambiente (PROFEPA 2013).

El Plan de Desarrollo de México considera el incremento en el tratamiento de las aguas residuales municipales e industriales y de los residuos que se gestionan integralmente. A partir del 2004 ha existido una evolución positiva en cuanto al aumento de caudal tratado de agua residual municipal en el país (CONAGUA 2014a, 2014b).

En los países en desarrollo existe una mayor conciencia y participación de la población en relación a estos temas. La Organización Mundial de la Salud estima que para tener un acceso óptimo la cantidad promedio diaria es de 100 litros/Habitante/día (OMS 2016). En México se estima que la dotación media por habitante es de 240 litros por habitante al día (Agua.org 2010), el 63% del agua utilizada proviene de fuentes superficiales y el 37% restante es de extracción de acuíferos.

La Ciudad de México está integrada por 16 municipios y es la segunda entidad más poblada en el país con 10 millones 330 mil 966 habitantes, según censo de población 2010 (INEGI 2015b). Cuenta con 25 plantas de tratamiento básico de aguas residuales (no eliminan nutrientes), en estas plantas se trata el 17% de las aguas servidas; este valor de tratamiento se incrementó de 13.6% en 2014 al 17% de cobertura de tratamiento de las aguas residuales en 2015, información proporcionada por la oficina de información pública de CDMX; cuenta con 99.8% de cobertura de alcantarillado (SEMARNAT y CONAGUA 2014). En la **Tabla 16** se presenta la capacidad instalada y caudal tratado, de acuerdo al número de plantas con las que cuenta la Ciudad de México (CONAGUA 2014b).

Tabla 16. Inventario de PTAR en la CDMX (CONAGUA 2014b).

	No. Plantas	Capacidad Instalada l/s	Caudal Tratado (l/s)
Ciudad de México	25	5 504	3 328

De acuerdo al bajo porcentaje de agua residual que se trata en la Ciudad de México (17%) existen grandes cantidades de aguas servidas sin tratar (83%) que se descargan al medio receptor natural (presas, ríos, lagos y mares) y que por lo tanto generan un gran nivel de contaminación. Este es el caso de las aguas residuales de la Ciudad de México y Zona Conurbada que tienen un recorrido de 513 km hasta el Golfo de México (medio receptor) y que en su trayecto contaminan la flora, fauna, asentamientos humanos, producción agrícola, aguas superficiales y subterráneas, zonas costeras, etc. (PROFEPA 2013; Breña Puyol y Rojas Serna 2015).

En la **Tabla 17** se presentan las plantas de tratamiento de aguas residuales en operación en la Ciudad de México (CONAGUA 2014b).

Tabla 17. *Inventario de PTAR en la Ciudad de México (CONAGUA 2014b)*

No.	Nombre	Capacidad Instalada (l/s)	Caudal Tratado (l/s)	Eliminación de nutrientes
1	ABASOLO	15	5	X
2	ACUEDUCTO DE GUADALUPE	110	59	X
3	BOSQUE DE LAS LOMAS	25	23	X
4	CERRO DE LA ESTRELLA	3000	2188	X
5	CIUDAD DEPORTIVA	230	93	X
6	COYOACÁN	250	179	X
7	CHAPULTEPEC	160	74	X
8	EL LLANO	250	13	X
9	IZTACALCO	13	13	X
10	LA LUPITA	15	15	X
11	MAGDALENA	50	25	X
12	PARRES	7.5	3	X
13	PEMEX-PICACHO	13	13	X
14	RECLUSORIO SUR	30	10	X
15	ROSARIO	25	14	X
16	SAN ANDRES MIXQUIC	30	22	X
17	SAN JUAN DE ARAGÓN	500	269	X
18	SAN LUIS TLAXIALTEMALCO	150	73	X
19	SAN LORENZO	225	85	X
20	SAN MIGUEL XICALCO	7.5	7	X
21	SAN NICOLÁS TETELCO	15	10	X
22	SAN PEDRO ATOCPAN	60	35	X
23	SANTA FE	280	70	X
24	SANTA MARTHA	21	14	X
25	TLATELOLCO	22	16	X

La Ciudad de Aguascalientes cuenta con una población de 1 *millón 252 mil 024 habitantes*, según censo de población 2010 (INEGI 2015b). Cuenta con 29 plantas de tratamiento básico de aguas residuales (no eliminan nutrientes) que tratan el **100%** de las aguas servidas; y dispone de un 98.4% de cobertura de alcantarillado (SEMARNAT y CONAGUA 2014). En la **Tabla 18** se presenta la capacidad instalada y caudal tratado de acuerdo al número de plantas con las que cuenta la Ciudad de Aguascalientes (CONAGUA 2014b).

Tabla 18. *Inventario de PTAR en la Ciudad de Aguascalientes (CONAGUA 2014b).*

		No. Plantas	Capacidad Instalada l/s	Caudal Tratado (l/s)
Ciudad de Aguascalientes		39	4 278	3 078.6

La Ciudad de Aguascalientes trata el 100% de las aguas servidas que llegan a las PTAR, esta agua residual es descargada al medio receptor natural (presas, ríos, lagos y mares) sin realizar previamente una eliminación de nutrientes, por lo tanto generan un desequilibrio en el medio receptor. (PROFEPA 2013; Breña Puyol y Rojas Serna 2015).

En la **Tabla 19** se presentan las plantas de tratamiento de aguas residuales en operación en la Ciudad de Aguascalientes (CONAGUA 2014b).

Tabla 19. *Inventario de PTAR en la Ciudad de Aguascalientes (CONAGUA 2014b)*

No.	Nombre	Capacidad Instalada (l/s)	Caudal Tratado (l/s)	Eliminación de nutrientes
1	ASIENTOS	30	12	X
2	CALVILLO	150	53	X
3	CERRO BLANCO	1	0.1	X
4	CIUDAD	2000	1980	X
5	COSÍO NORTE	18	16	X
6	EL CEDAZO	150	84	X
7	EL REFUGIO DE PEÑUELAS	10	3.5	X
8	FERRONALES	40	28	X
9	JALTOMATE	7	3	X
10	JESÚS MARÍA	200	90	X
11	LOMITA DE PASO BLANCO	100	42	X
12	LOS ARELLANO	300	125	X
13	LOS SAUCES	100	98	X
14	NORIAS DE OJOCALIENTE	10	7	
15	PABELLÓN DE ARTEAGA	200	105	X
16	PABELLÓN DE HIDALGO	12	10	X
17	PAREDES	6	4	X
18	PIVA	50	27	X
19	POCITOS	300	125	X
20	RINCÓN DE ROMOS	200	96	X
21	SAN FCO DE LOS ROMO	150	42	X
22	SAN JACINTO	7	3	X
23	SAN JOSÉ DE GRACIA	25	15	X
24	SAN JUAN DE LA NATURA	5	3	X
25	TEPEZALA	12	7	X
26	VILLA JUÁREZ	20	12	X
27	VILLAS DE NUESTRA SRA.	50	27	X
28	LA NATURA	50	14	X
29	JILOTEPEC	2	1	X

30	PALO ALTO	20	12	X
31	EMILIANO ZAPATA	8	5	X
32	REENCUENTRO	8	4	X
33	CIENEGA GRANDE	6	3	X
34	COSIO SUR	6	4	X
35	EL SALITRE	3.5	4	X
36	LOMAS DEL REFUGIO	2	1	X
37	TAPIAS VIEJAS	2	1	X
38	EL PILA	7.5	5	X
39	CAMPOS SUR	10	7	X

3.3 Situación GEI en Cataluña

Las emisiones de gases de efecto invernadero en 2013 en Cataluña fueron de 42.77 MtCO₂e, con una reducción de 8% respecto al año anterior (3.5 MtCO₂e menos). Fue a partir del 2005 cuando se inició un cambio de tendencia en las emisiones totales de esta comunidad autónoma, para así cumplir con lo aceptado en el Protocolo de Kioto (GENCAT 2013b).

En la **Tabla 20** se presenta el porcentaje de emisión de los Gases de efecto invernadero en Cataluña, de acuerdo al inventario de la Generalitat de Cataluña (GENCAT 2013b).

Tabla 20. Emisión Neta de GEI en Cataluña 2013. (Fuente: GENCAT 2013)

Nombre Industrial	Fórmula Química	Emisión Neta 2013
Dióxido de Carbono	CO ₂	77%
Metano	CH ₄	15%
Óxido Nitroso	N ₂ O	5%
Otros	HFC, PFC, SF	3%

La emisión de cada gas de efecto invernadero en el 2013 en Cataluña, expresado en ktCO₂e se muestra en la **Tabla 21** a continuación:

Tabla 21. Emisión GEI en Cataluña 2012 (Fuente: (GENCAT 2013b))

EMISIÓN GEI POR FUENTES ANTROPOGENICAS, ktCO ₂ e	
Dióxido de Carbono	32 932.31
Metano	6 302.44
Óxido Nitroso	2 081.96

La emisión de GEI en Cataluña por tratamiento y eliminación de residuos corresponde al 6% del total en el año 2013 (**Figura 2**), (GENCAT 2013a).

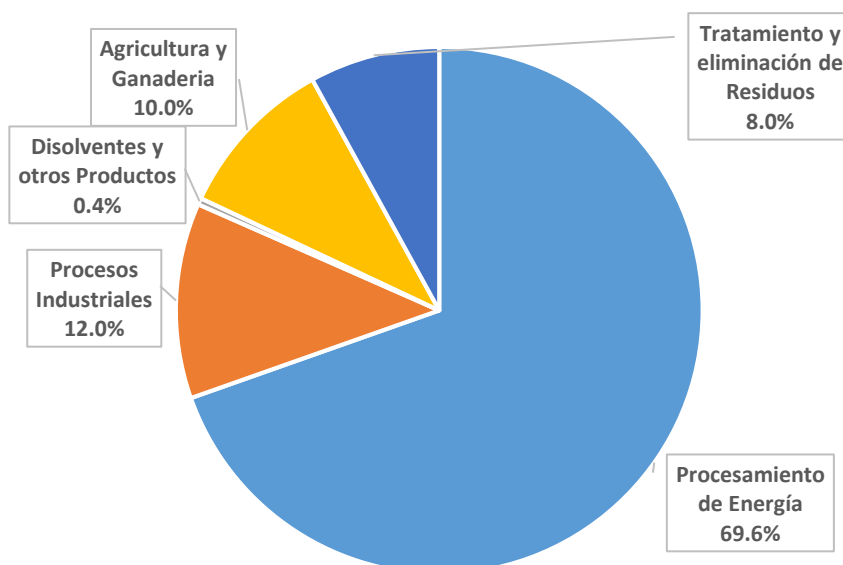


Figura 2. Emisión de GEI por sectores en Cataluña 2013. (Fuente: GENCAT 2013)

De este 8% que corresponde al tratamiento y eliminación de residuos, en específico para el tratamiento de aguas residuales en 2013 se generaron 272.8 ktCO₂e, que se desglosan en la **Tabla 22** (GENCAT 2013b).

Tabla 22. Emisión de GEI por Tratamiento de aguas residuales en Cataluña 2013. (Fuente: GENCAT 2013)

EMISIÓN GEI POR TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, ktCO ₂ e	
Metano	114.7
Óxido Nitroso	158.1
Total	272.8 ktCO₂e

Cataluña al ser parte del Estado Español aceptó el objetivo del Protocolo de Kioto para la disminución de emisiones difusas, con hasta un 15% más permitido respecto al año base; los gases de efecto invernadero participan en la generación de las emisiones difusas. En la **Tabla 23** se muestra el comparativo entre las emisiones difusas de Cataluña de los años 2008 al 2012 y el objetivo aceptado en el Protocolo de Kioto, año tras año se puede observar un comportamiento de disminución de estas emisiones, que hace cumplir el objetivo de la media establecida para el periodo 2008-2012 (GENCAT 2013a).

Tabla 23. Emisiones difusas Cataluña vs Objetivo Protocolo de Kioto. (Fuente: (GENCAT 2013a))

Emisiones en MtCO ₂ e	2008	2009	2010	2011	2012	Media 2008-2012
Emisiones difusas Cataluña	32.8	31.2	31.3	29.1	28.6	30.6
Objetivo Protocolo de Kioto (+15% Año Base)	30.7	30.7	30.7	30.7	30.7	30.7

3.4 Situación del Estado Actual del Tratamiento de Aguas Residuales en específico del AMB

El Área Metropolitana de Barcelona está integrada por 36 municipios y cuenta con 7 plantas de tratamiento avanzado de aguas residuales (cuenta con eliminación de nutrientes), en estas plantas se trata el **100%** de las aguas residuales que genera su población de *3 millones 239 mil 337 habitantes*; su consumo por habitante es de 102.3 l/día (AMB 2016). En la **Figura 3** se presenta el caudal total tratado de agua residual en las plantas de tratamiento del AMB del 2011 al 2015 (AMB 2016).

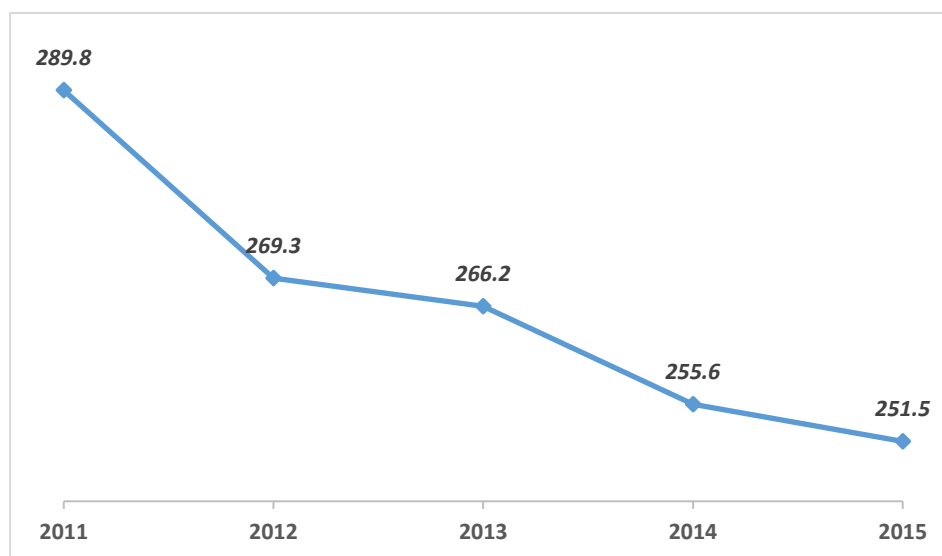


Figura 3. Evolución del caudal de agua residual tratada en AMB (millones de m³/año). (Fuente: AMB 2016)

Como se puede apreciar en la **Figura 3**, existe un grado de concientización en la población del AMB, ya que se produce una disminución en el caudal tratado y esto puede ser debido a un menor consumo de agua de origen doméstico. En la **Tabla 24** se presenta el listado de plantas de tratamiento de agua residual en el AMB, su capacidad instalada y el caudal tratado al año en cada uno de las plantas.

Tabla 24. Plantas de tratamiento de agua residual en AMB 2015. (Fuente: AMB 2016)

No.	Planta	Capacidad Instalada (m³/día)	Caudal Tratado (m³/año)	Eliminación de nutrientes
I	Begues	1 200	340 062	✓
II	Gavà	64 000	13 547 225	✓
III	Besòs	525 000	116 547 659	X
IV	Prat	315 000	86 357 714	✓
V	Montcada	72 600	17 149 895	X
VI	Sant Feliu	64 000	17 412 261	✓
VII	Vallvidrera	1 100	258 658	✓
TOTAL		1 042 900	251 523 474	

Si analizamos el caudal tratado por planta de tratamiento de agua residual se observa que en todas las plantas existe una disminución de caudal tratado (**Tabla 25**), (AMB 2016).

Tabla 25. Caudal Total Tratado en Plantas de tratamiento de aguas residuales del AMB (m³/año). (Fuente: AMB 2016)

	Begues	Gavà	Besòs	Prat	Montcada	Sant Feliu	Vallvidrera
2011	497,698	15,667,023	134,559,000	100,789,407	19,390,637	18,495,096	372,764
2012	341,079	14,135,845	127,793,000	92,748,401	17,174,046	16,826,276	289,965
2013	352,052	14,926,929	123,771,000	91,432,198	17,701,007	17,757,871	287,635
2014	321,091	13,279,991	118,080,000	88,519,768	17,576,677	17,501,815	278,363
2015	340,062	13,547,225	116,457,659	86,357,714	17,149,895	17,412,261	258,658

4 METODOLOGÍA

En el apartado 2 de este trabajo se hace referencia a las metodologías de cuantificación de N₂O encontradas en la literatura y artículos científicos.

Los métodos de cuantificación que se aplican para conocer la emisión de óxido nitroso de las PTAR, son el método empírico propuesto por el IPCC (IPCC 2006) para el cálculo de emisión de aguas residuales despreciando las emisiones del tratamiento de lodos; y los métodos integrales de Doorn y Liles (Doorn y Liles 1999) para cuantificar las emisiones de la línea de aguas, y el propuesto por Lara y Préndez para la cuantificación de la emisión del tratamiento de lodos (Lara y Préndez 2003).

Los métodos empíricos se basan en suposiciones, permiten retomar experiencia de otros autores o investigaciones, ya que cuentan con datos sugeridos por defecto que se deben justificar de acuerdo a si son aplicables al caso de estudio en particular; resultan en un procedimiento práctico, y además, posibilita el conocer el orden de magnitud de producción de N₂O. Los métodos integrales son procedimientos simultáneos y complementarios, se basan en la configuración de cada planta y por lo tanto en datos propios de cada una, por lo que se considera un método específico de análisis global.

El *método del IPCC* se utiliza en este trabajo para la cuantificación de emisiones directas en plantas de tratamiento de aguas residuales del Área Metropolitana de Barcelona donde se realice eliminación de nutrientes; mientras que las emisiones indirectas se calcularán a partir de las aguas servidas que no reciben tratamiento de eliminación de nutrientes en Ciudad de México, Ciudad de Aguascalientes y el AMB.

Los *métodos de Doorn-Liles y Lara-Préndez* se utilizan de manera conjunta en este trabajo para obtener de manera específica la emisión y análisis de PTAR por PTAR de la CDMX y el AMB, a partir de los valores de DBO y la emisión generada a partir de la disposición de lodos.

Para presentar el resultado final de emisión de N₂O se utiliza la ecuación de Lexmond y Zeeman (1995) (**Tabla 26**) en base a las equivalencias de poder de calentamiento global del CO₂ en una proyección de 100 años (**Tabla 1**):

Tabla 26. Conversión a tCO₂e. (Fuente: (Lexmond y Zeeman Grietje 1995))

CONVERSIÓN A tCO ₂ e	
$PCG = N_2O \bullet PCG_{N_2O}$	
<i>Donde:</i>	
PCG=	Potencial de Calentamiento Global, tCO ₂ e
N₂O=	Emisión de N ₂ O atmosférico anual, tN ₂ O
PCG_{N2O}=	Potencial de Calentamiento Global del N ₂ O según horizonte temporal, tCO ₂ e

4.1 Emisiones Directas de N_2O - IPCC

Para el cálculo de emisiones directas ($\text{N}_2\text{O}_{\text{PLANTAS}}$), la metodología requiere dos parámetros propios de la planta de tratamiento (**Tabla 2**), como lo son: la población humana servida con el tratamiento y el grado de utilización de las plantas de tratamiento de aguas residuales; además considera valores por defecto de la fracción de proteínas industriales y comerciales co-eliminadas (1.25), y el factor de emisión de la planta (3.2 g N_2O /persona/año).

En el caso del AMB se considera la emisión directa porque es un tratamiento centralizado avanzado y, por lo que se encuentra en la literatura y en las mismas directrices de la IPCC, las emisiones de N_2O serán casi despreciables del mismo proceso de tratamiento. La obtención de la información del AMB fue de fácil acceso. Se cuenta con información proporcionada por el Área Técnica de Saneamiento e Inspección del Área Metropolitana de Barcelona, de las 7 Estaciones de Tratamiento de Aguas Residuales con las que cuenta la zona; los datos son de los años 2011 al 2015. Para la estimación del valor de emisión directa de N_2O se considera solo la población servida de 5 de las 7 estaciones, ya que solo la estación del Begues, El Prat, Gavà, Sant Feliu y Vallvidrera realizan eliminación de nutrientes. El grado de utilización de las plantas se obtiene a partir de la relación de población que se beneficia con el tratamiento en las PTAR y aquellas instalaciones en donde se realiza el proceso de eliminación de nutrientes; en el AMB existe un 100% de tratamiento de aguas residuales. El número de población total es de acuerdo al registro del padrón 2014.

4.2 Emisiones Indirectas de N_2O - IPCC

Para estimar las emisiones indirectas de N_2O ($\text{N}_{\text{EFLENTE}}$) derivadas del manejo y tratamiento de las aguas residuales municipales, la metodología del IPCC (**Tabla 3**) requiere dos parámetros propios de las plantas de tratamiento de aguas residuales y del país de análisis: el número de habitantes servidos con el tratamiento del agua residual y el consumo de proteína por persona, que son datos proporcionados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO 2015); además esta metodología requiere: la fracción de N contenida en las proteínas (0.16 kg N/kg proteína), el factor de proteínas no consumidas añadidas a las aguas residuales (1.4 para países desarrollados que utilizan trituradores de desechos, 1.1 para países en desarrollo), y el factor de proteínas industriales y comerciales co-eliminadas en los sistemas de alcantarillado (1.25), que son datos por defecto que proporciona el IPCC. La ecuación se divide en dos partes: el N en el efluente eliminado en medios acuáticos y el factor de emisión para emisiones de N_2O proveniente de la eliminación de aguas tratadas.

Por lo tanto, las emisiones dependerán en gran medida de los factores por defecto que se consideran y de la información proporcionada por cada entidad facilitadora de datos.

El cálculo de la emisión indirecta de las plantas del AMB se realiza considerando la población servida de 2 de las 7 estaciones de tratamiento con las que cuenta la zona, las PTAR del Besòs y Montcada no cuentan con eliminación de nutrientes. La emisión indirecta de las 5 PTAR restantes se considera despreciable de acuerdo al 90% de eliminación de nutrientes.

Las emisiones indirectas para el caso de México donde no se realiza eliminación de nutrientes (tratamiento avanzado) y la emisión de N_2O se produce desde el medio receptor natural (ríos, lagos, etc.), el inventario se realiza considerando las aguas servidas de acuerdo a la cobertura de alcantarillado de la Ciudad de Aguascalientes y la Ciudad de México, ya que fueron las únicas

entidades del país que proporcionaron información para la realización de este trabajo. La Ciudad de Aguascalientes es uno de los estados a escala nacional que reporta un 100% de tratamiento de las aguas servidas que llegan a PTAR, y tiene una cobertura de alcantarillado del 98.4% (Cifras Oficiales) (SEMARNAT y CONAGUA 2014). La Ciudad de México es la segunda entidad más poblada en el país con alrededor de 10 millones de habitantes, según censo de población 2010 (INEGI 2015b); tiene una cobertura de tratamiento de aguas servidas del 17% y 99.8% de alcantarillado. Se estimará la emisión a escala nacional teniendo en cuenta el nivel de disponibilidad del sistema de alcantarillado por proporción de población de los años 2000 al 2015, de acuerdo a la población en el último censo oficial (INEGI 2010) y la tasa de crecimiento en México (1.4%). El porcentaje de disponibilidad de alcantarillado son datos oficiales extraídos del Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018 (SEMARNAT y CONAGUA 2014).

Se detectó que en México la información a nivel nacional no está disponible, además que para poder obtener la información con la que se cuenta fue necesario pasar por una serie de requisitos y filtros a nivel gubernamental.

**Ciudad de México, anteriormente conocida como Distrito Federal.*

4.3 Emisiones de N_2O del tratamiento de aguas residuales - Doorn y Liles

Para el cálculo de emisiones del tratamiento de aguas residuales, la metodología requiere de parámetros propios de cada planta de tratamiento (**Tabla 4**) como lo son: la población humana servida con el tratamiento (P), la carga orgánica per cápita (DBO_p) en g DBO /habitante/año, y la fracción de DBO fácilmente degradada en cada PTAR (F_{DBO}); además considera por defecto el factor de emisión (F_E) de 0.051 g N_2O /g DBO_r .

La carga orgánica per cápita DBO_p se obtiene a partir del caudal de entrada, la DBO de entrada y la población servida con el tratamiento. La fracción de DBO fácilmente degradada F_{DBO} se calcula con los valores de DBO de entrada y DBO de salida para cada una de las plantas, este valor se encuentra entre un rango de 0 a 1.

El cálculo de emisión de N_2O del tratamiento de aguas residuales se aplicará a las PTAR de la Ciudad de México y el Área Metropolitana de Barcelona.

4.4 Emisiones de N_2O del tratamiento de lodos - Lara y Préndez

La metodología para la cuantificación de la emisión de N_2O del tratamiento de lodos (**Tabla 5**) requiere de parámetros propios de la planta de tratamiento, como: el lodo producido por planta (L_p), el contenido de nitrógeno en el lodo producido por tipo de tratamiento (N_l); y considera por defecto el factor de emisión directo de N_2O (FEN) de 0.025 kg N_2O -N/kg N en lodo producido.

El lodo producido por planta (L_p) se obtiene a partir de lo que se propone en (Metcalf y Eddy 2014), debido a que no se cuenta con información específica sobre la generación de lodos de ninguna de las plantas de tratamiento. En la **Tabla 27** se presenta la consideración de producción de lodos por tipo de tratamiento aplicado.

Tabla 27. *Cantidades típicas de lodos producidos a partir de diversas operaciones y procesos de tratamiento de aguas residuales. (Fuente: (Metcalf y Eddy 2014))*

Proceso de Tratamiento	Producción de sólidos secos, kg/10 ³ m ³	
	Rango	Valor Típico
Sedimentación primaria	110 – 170	150
Lodos activados	70 – 100	80
Filtro biológico	60 – 100	70
Aireación extendida	80 – 120	100
Laguna Aireada	80 – 120	100
Filtración	12 – 24	20
Remoción con algas	12 – 24	20
Sedimentación primaria con adición de cal (350-500 mg/l)	240 – 400	300
Sedimentación primaria con adición de cal (800-1600 mg/l)	600 – 1300	800
Desnitrificación con biomasa suspendida	12 – 30	18

El cálculo de emisión de N₂O del tratamiento de lodos se aplicará a las PTAR de la Ciudad de México y el Área Metropolitana de Barcelona.

En el caso del AMB se toma un valor de 220 kg por cada 1000 m³ de caudal de entrada tratado, considerando una sedimentación primaria con tratamiento de lodos activados. En el caso de México solo se considerarán las PTAR de la Ciudad de México, y se toman valores de 220 kg/1000 m³ de caudal tratado para sedimentación primaria con tratamiento de lodos activados, 210 kg/1000 m³ de caudal tratado para sedimentación primaria con filtros biológicos, 20 kg/1000 m³ de caudal tratado para filtración, 300 kg/1000 m³ de caudal tratado para sedimentación primaria avanzada, y 24 kg/1000 m³ de caudal tratado para humedales.

El contenido de N en el lodo (N_l) se considera de 3.7% para las PTAR de la Ciudad de México, de acuerdo a un estudio realizado sobre los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Limón 2013). El contenido de N en el lodo para las PTAR del AMB es de 3.62%, dato extraído de un artículo de investigación donde se analizan lodos procedentes de depuradoras de aguas residuales españolas (Colomer-Mendoza et al. 2010).

La composición típica de nitrógeno en lodos activados sin tratar se encuentra dentro de un rango de 2.4 – 5 %, teniendo un valor típico de 3.8% (Metcalf y Eddy 2014).

5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados presentados a continuación corresponden al cálculo de las proyecciones efectuadas para las emisiones de óxido nitroso provenientes de las aguas residuales gestionadas en el Área Metropolitana de Barcelona y en México (Ciudad de México y Ciudad de Aguascalientes en específico), de acuerdo a lo planteado anteriormente en el apartado 4. Los valores numéricos ocupados para estas cuantificaciones se encuentran en el **Anexo B** de este trabajo.

5.1 Emisiones Directas de N₂O - IPCC

En la **Figura 4** se presenta la emisión directa de N₂O de las PTAR del AMB del año 2015. Al no existir un tratamiento de eliminación de nutrientes en las PTAR de México, no se estima la emisión directa que es propia del proceso de tratamiento de aguas residuales que incluyen procesos de nitrificación y desnitrificación.

Como se aprecia en la **Figura 4**, las PTAR del Besòs y Montcada no presentan emisión directa de N₂O ya que en estas dos plantas no se aplica un tratamiento para eliminación de nutrientes. El total de **emisión directa** de óxido nitroso en el año 2015 de las PTAR del Área Metropolitana de Barcelona es de **1 442 tCO₂e**; siendo la PTAR del Prat la que más aporta con 1 055 tCO₂e/año, esta planta le da servicio a un 73% de la población servida con tratamiento de eliminación de nutrientes. El total de población servida con tratamiento de eliminación de nutrientes es de 1 360 080 habitantes que equivale al 42% de la población total del AMB.

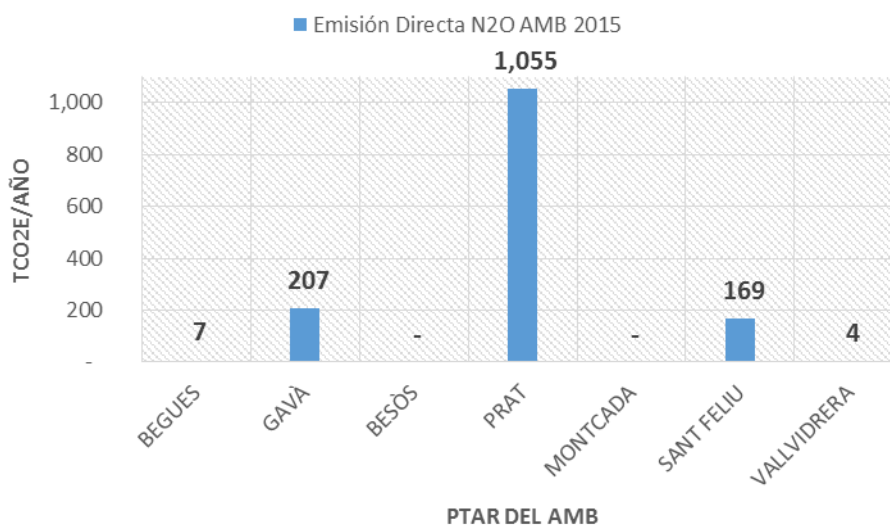


Figura 4. Emisión Directa de N₂O en el 2015 por PTAR del AMB.

El IPCC considera que las emisiones provenientes de las plantas centralizadas avanzadas de tratamiento de aguas residuales son mucho menores que las de los efluentes y es probable que solo sean de interés para los países donde predominan las plantas centralizadas avanzadas de tratamiento de aguas servidas con etapas controladas de nitrificación y desnitrificación, es por ello, que en este trabajo se considera despreciable la emisión indirecta de plantas centralizadas avanzadas de acuerdo a lo considerado por el mismo IPCC.

La metodología del IPCC no considera para la cuantificación de emisión de N₂O, el tipo y características de tratamiento empleado en la PTAR. Los datos empleados para la estimación

de esta cuantificación directa de N₂O en las PTAR del AMB son de dominio público y se encuentran en la página oficial del AMB.

5.2 Emisiones Indirectas de N₂O – IPCC

De acuerdo a la metodología propuesta por el IPCC, las emisiones indirectas del AMB corresponden a las 2 plantas cuyas aguas servidas no reciben tratamiento de eliminación de nutrientes antes de verterse al medio receptor natural. La **emisión indirecta** de las aguas servidas sin eliminación de nutrientes del AMB corresponde a **41 385 tCO₂e** en el 2015, esta emisión representa al 58% de la población total del AMB (1 854 131 habitantes).

La **emisión global de N₂O (Figura 5)** a partir del tratamiento de aguas residuales en el **AMB** (emisiones directas e indirectas) es de **42 826 tCO₂e** del 2015. De este total, el 3% corresponde a emisiones directas y el 97% restante a emisiones indirectas. De acuerdo a este valor, la emisión por habitante es de 0.013 tCO₂e al año. *El AMB cuenta con 100% de aguas servidas.*

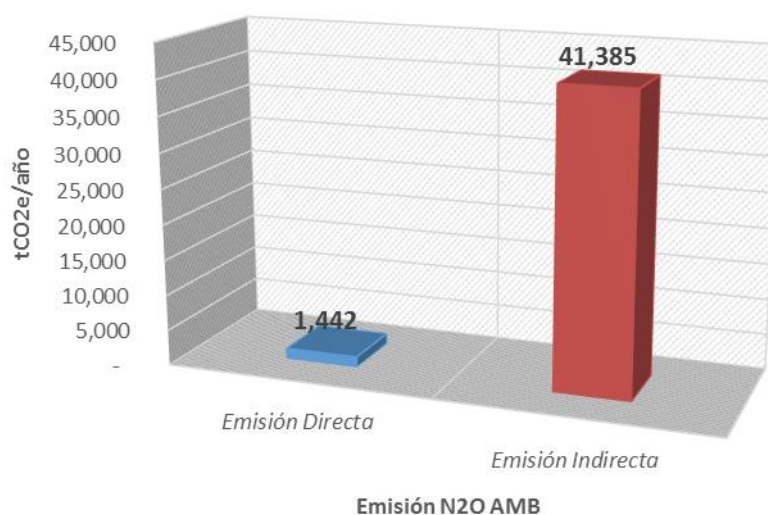


Figura 5. Emisiones Directas e Indirectas de N₂O del AMB en 2015.

La emisión global en el AMB es mayor a la esperada, debido a que existe un 58% de población servida en las dos PTAR que no eliminan nutrientes del agua que tratan, pero aun así, los valores conseguidos demuestran que con la aplicación de los tratamientos de nitrificación y desnitrificación, la emisión directa propia del tratamiento es realmente menor a la emisión indirecta del efluente.

Para el caso de México, las emisiones indirectas se calculan a partir de las aguas servidas, de acuerdo a la cobertura de alcantarillado en la Ciudad de México y la Ciudad de Aguascalientes en el año 2015, en la **Figura 6** se compara la emisión de óxido nitroso generado por estas dos zonas. La **emisión** de N₂O que se produce en la **Ciudad de México** es de **122 462 tCO₂e** y representa al 99.8% de las aguas servidas de la ciudad; CDMX trata el 17% de sus aguas servidas. La **emisión de Aguascalientes** es de **17 593 tCO₂e** de 98.4% de aguas servidas totales; Aguascalientes trata el 100% de las aguas servidas, según datos oficiales de SEMARNAT y CONAGUA. Al no existir eliminación de nutrientes en México, todas las aguas servidas producen la emisión de N₂O desde el medio receptor natural al que es vertida.

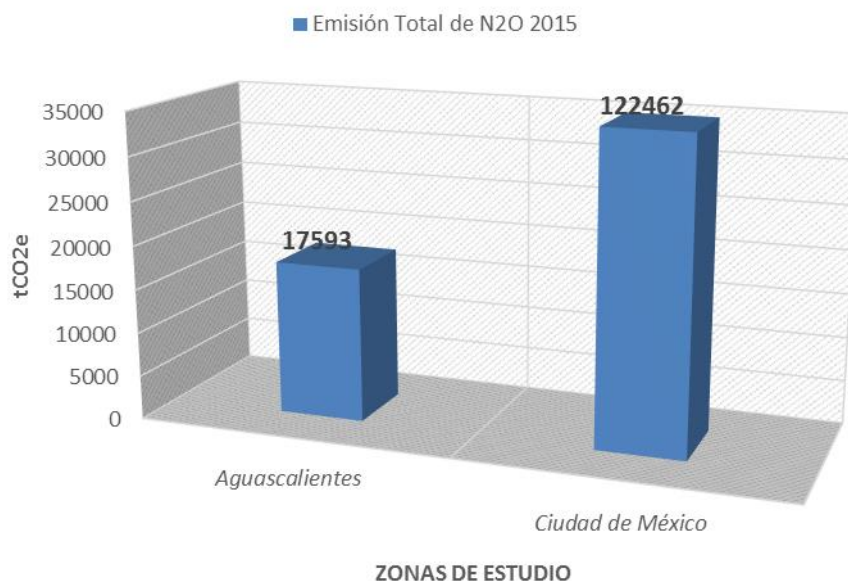


Figura 6. Emisión de N₂O de aguas servidas en Aguascalientes y Ciudad de México 2015.

Los resultados de emisión de óxido nitroso obtenidos a partir de la metodología del IPCC pueden estar influenciados por los valores por defecto que propone la misma metodología; la ingesta de proteína per cápita también es un valor que puede intervenir en los resultados, ya que al comparar las aguas servidas de México y España (AMB en específico) estos valores son diferentes entre ambos países.

Los valores por defecto propuestos por el IPCC se basan en escasos datos de terreno y sobre hipótesis específicas en lo referido a la nitrificación y desnitrificación en ríos y estuarios. Estos factores y valores de emisión fueron determinados durante pruebas de campo en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas en el norte de Estados Unidos, por lo que no deberían considerarse como generales y aplicables a toda planta y país.

En la **Figura 7** se muestra un comparativo de emisión de N₂O considerando las aguas servidas a escala nacional en México y la emisión total de N₂O que se produciría si existiera una cobertura total de alcantarillado. Los datos de alcantarillado son cifras oficiales obtenidas de la SEMARNAT y la CONAGUA, y la población es de acuerdo al último censo en 2010. A escala nacional México trata solo el 53% de sus aguas servidas y el 47% resto del agua va directamente a un medio receptor natural. Al no existir tratamiento para eliminar los nutrientes, la emisión de N₂O se produce en el medio natural receptor.

Como se aprecia en la **Figura 7**, existe un aumento de cobertura de alcantarillado, de un 24% de falta de alcantarillado en el 2000 a un 8% en 2015. La **emisión de N₂O** es de **1 589 MtCO₂e en 2015** con una cobertura del 92%; y el **total de emisión** de acuerdo al número de población existente a nivel nacional es de **1727 MtCO₂e**, lo que equivale a 0.014 tCO₂e/habitante/año.

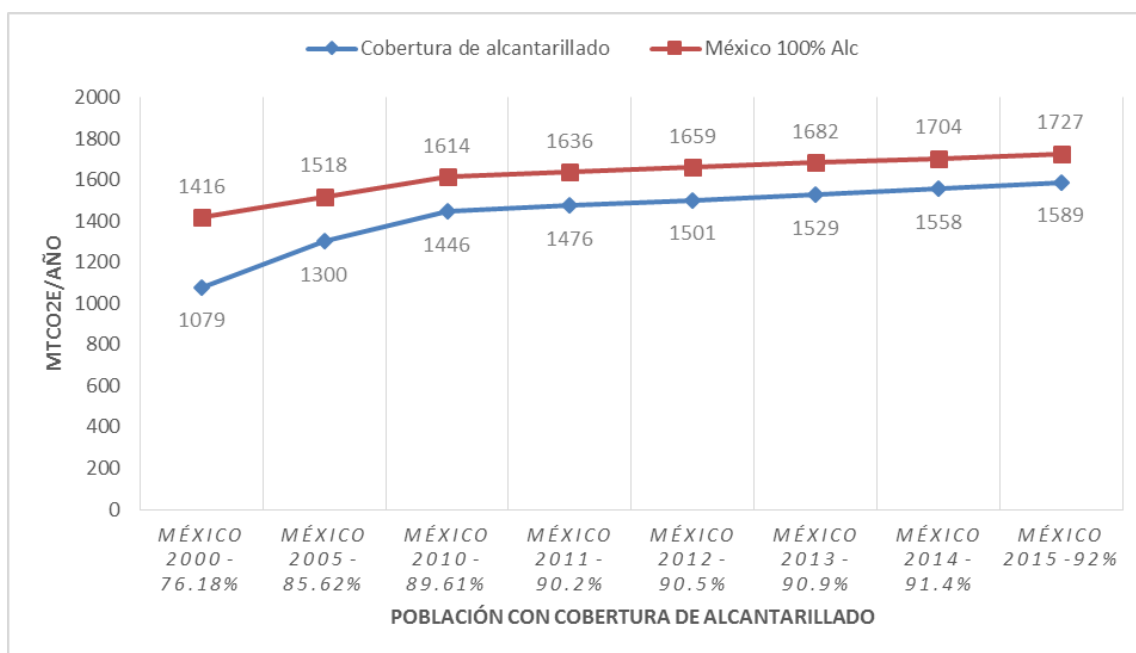


Figura 7. Óxido nitrroso emitido de las aguas servidas vs emisión total a escala nacional en México.

5.3 Emisiones del tratamiento de aguas residuales – Doorn y Liles y del tratamiento de lodos – Lara y Préndez

Los valores obtenidos de emisión de óxido nitrroso aplicando las metodologías de Doorn-Liles y Lara-Préndez desde las 7 plantas en operación de tratamiento de aguas residuales del Área Metropolitana de Barcelona del año 2015 se presentan en la **Figura 8**. Las plantas estudiadas presentan características diferentes entre ellas y por lo tanto, tienen un perfil diferente de emisión. La emisión de N_2O viene afectada o influida por el caudal de entrada y la población servida con el tratamiento (carga orgánica per cápita); es por ello que las PTAR del Besós y El Prat muestran valores más altos de emisión, tanto en el tratamiento del agua como en el tratamiento de los lodos. La aportación total de la PTAR del Besós es de 14 762 tCO₂e, mientras que El Prat aporta 10 702 tCO₂e. El Besós tiene el 50% de población servida con el tratamiento total del AMB.

Cuando existe un tratamiento de nitrificación/desnitrificación la emisión mayor se da durante el tratamiento de fangos, esto puede representar un 30% más de emisión con respecto a la propia del tratamiento.

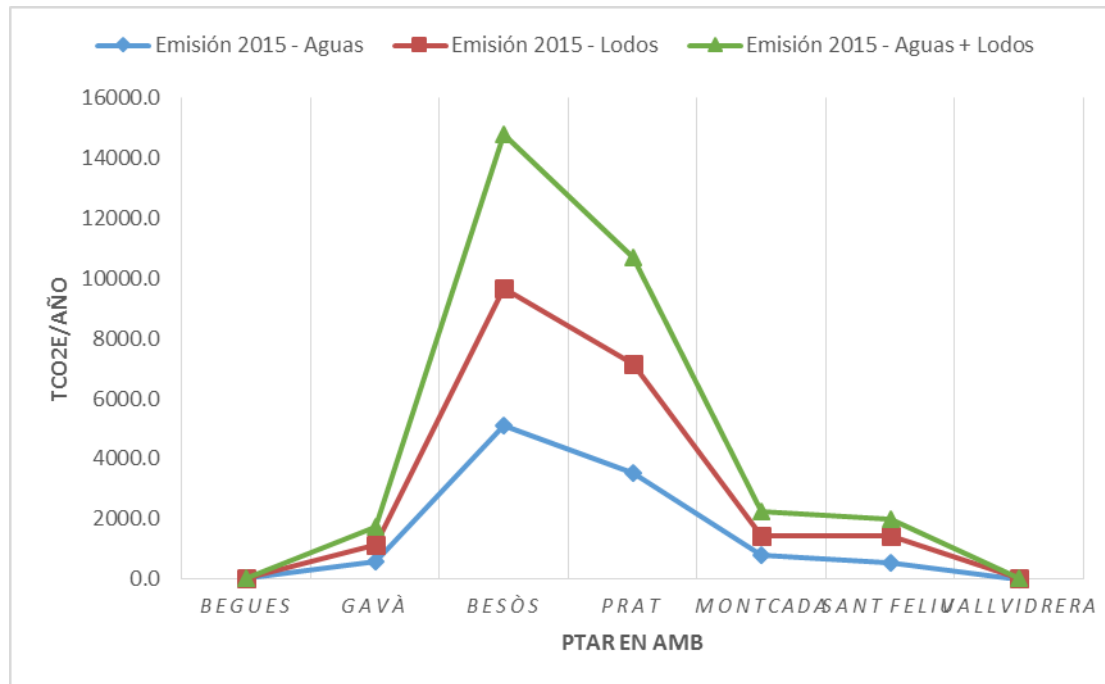


Figura 8. Óxido nítrico emitido desde PTAR del AMB en 2015.

El AMB aplica reactores biológicos en sus PTAR, por lo que no se realiza ningún análisis comparativo de emisión por tipo de proceso, de acuerdo a estas PTAR la emisión de N₂O en reactores biológicos es de 0.009 tCO₂e/habitante al año.

La emisión de óxido nítrico desde las 25 PTAR en operación de la Ciudad de México en el año 2015 se presenta en la **Figura 9**. Las plantas estudiadas presentan diferentes características entre sí (diferentes tipos de tratamiento de aguas), es por ello que no existe una tendencia de emisión entre ellas. La PTAR del Cerro de la Estrella presenta la mayor emisión de la CDMX en aguas tratadas y del tratamiento de lodos, esto debido a que tiene el 70% de población total servida con tratamiento de la Ciudad de México (1 267 200 habitantes de 1 806 440). Los caudales de entrada y la población servida con el tratamiento son factores de emisión de N₂O importantes a considerar. La PTAR de San Juan de Aragón es la segunda PTAR en aportar con 620 tCO₂e/año, seguida de El Llano con 504 tCO₂e/año.

El tratamiento de lodos procedentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales es el proceso que más emite N₂O, y puede llegar a representar alrededor del 30% más que el propio tratamiento del agua.

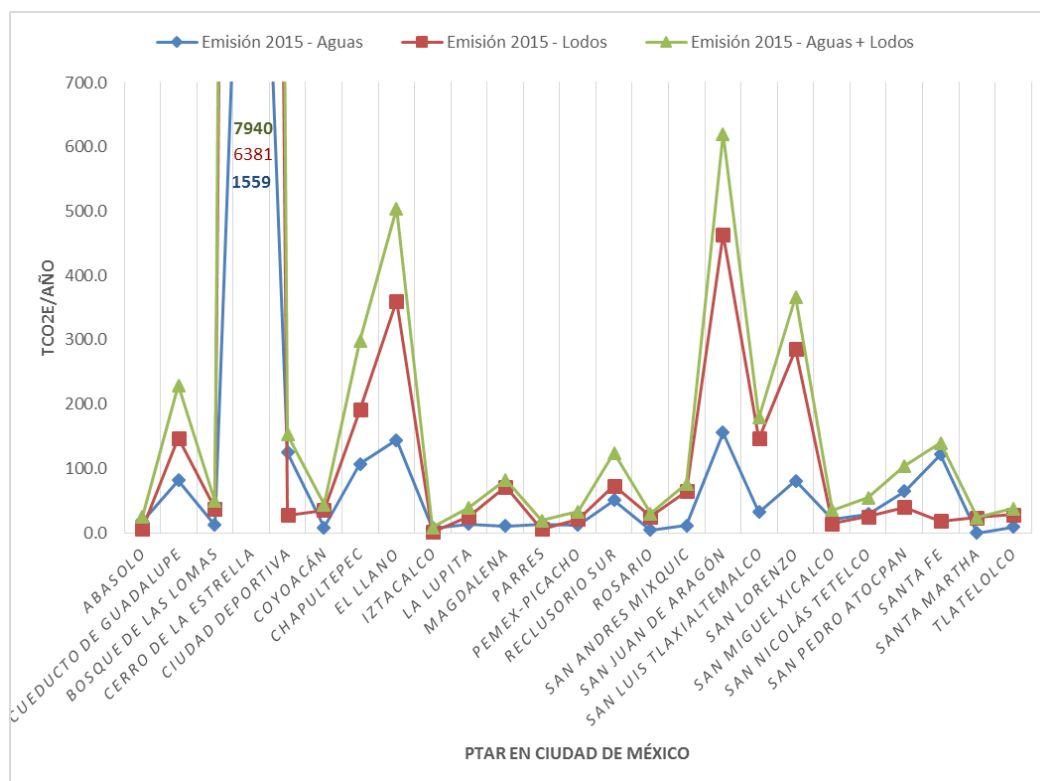


Figura 9. Óxido nítrico emitido desde PTAR de la CDMX en 2015

Si analizamos la emisión global de N₂O desde las PTAR del AMB y la CDMX (**Figura 10**) podemos comprobar que la emisión mayor se da en la Ciudad de México, puesto que el valor de 11 215 tCO₂e corresponde solo al **17% de cobertura** de tratamiento de aguas servidas con la que dispone la Ciudad, cuya contribución por habitante servido es de 0.006 tCO₂e en 2015. La emisión desde aguas tratadas y lodos dispuestos del AMB es de 31 488 tCO₂e, lo que equivale a 0.009 tCO₂e/habitante en el 2015. Cabe mencionar que la ingesta de proteínas y el consumo de agua por habitante es un factor a destacar para la emisión de este GEI.

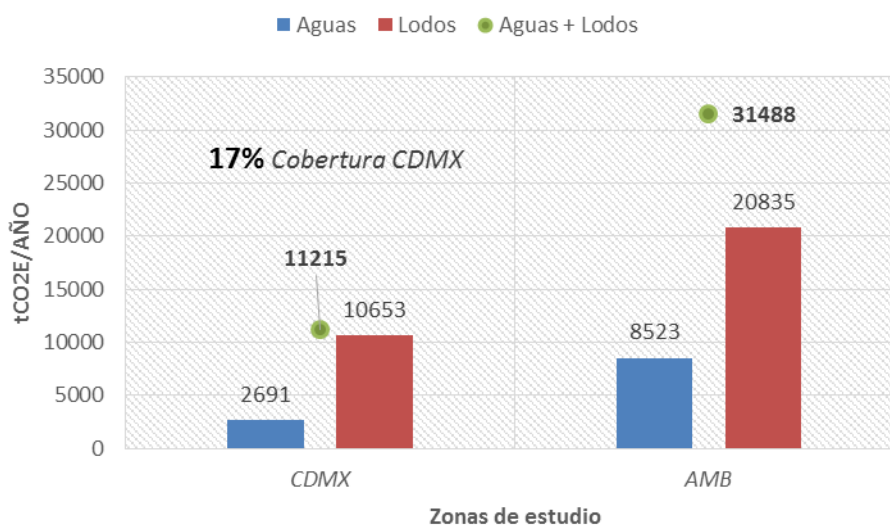


Figura 10. Óxido nítrico emitido en 2015 CDMX vs AMB.

La metodología de Doorn y Liles permite obtener la emisión de N₂O desde el proceso de tratamiento de las aguas residuales y además, evaluar la emisión según el tipo de proceso de tratamiento que se aplique. Esta metodología es más específica para cada planta de tratamiento de aguas residuales, y se ajusta a la realidad de la planta y su capacidad, al considerar la fracción de DBO degradada y la carga orgánica per cápita real que maneje cada planta según población y lugar.

Conforme a los resultados conseguidos con la aplicación conjunta de las metodologías de Doorn-Liles y Lara-Préndez en las PTAR de la Ciudad de México, son los lodos activados donde se produce mayor emisión de N₂O, aunque la diferencia de emisión con los otros tipos de tratamientos empleados en la CDMX no es tan diferenciada. Existen pocos datos para comparar y asegurar que la emisión que se produce entre los tratamientos es semejante. En el **Anexo C** de este trabajo se encuentra el listado de plantas de la Ciudad de México con el tipo de tratamiento que se emplea.

Los valores de emisión por tipo de tratamiento obtenidos de las PTAR de la Ciudad de México se presentan en la **Tabla 28**, siendo los lodos activados los que generan una mayor emisión de N₂O.

Tabla 28. Emisión de N₂O generada por tipo de PTAR en la Ciudad de México, expresada en tCO₂e/habitante/año.

Tipo de Tratamiento	Emisión tCO ₂ e/habitante/año
Lodos Activados	0.0086
Filtración	0.0053
Filtro Biológico	0.0055
Terciario	0.0059
Primario Avanzado	0.0081
Humedal	0.0043

La **Figura 11** presenta la emisión global de la CDMX considerando las aguas servidas que llegan a las PTAR y el resto de las aguas que van directamente del alcantarillado al medio receptor natural. Para estimar la emisión de N₂O del agua servida que llega a una PTAR se emplean las metodologías de Doorn-Liles y Lara-Préndez, y para el cálculo a partir del remanente de aguas servidas se utiliza la metodología del IPCC.

La **emisión total** de la **Ciudad de México** es de **108 090 tCO₂e/año**, lo que equivale a 0.01 tCO₂e/habitante/año (10 330 966 habitantes totales). La emisión de la CDMX sobrepasa a la del AMB en un 71%; aun con una cobertura del 100% de tratamiento de sus aguas servidas, la emisión del AMB es menor que la CDMX que solo dispone de un 17% de cobertura de tratamiento. Los tratamientos de eliminación de nutrientes son un factor importante de reducción de emisión, la emisión total del AMB corresponde a 0.009 tCO₂e/habitante en el 2015, mientras que para la CDMX es de 0.01 tCO₂e/habitante. La dieta diaria de la población es un factor importante en la emisión de este GEI, ya que al comparar ambas zonas de estudio, según datos oficiales de la FAO, en México se tiene una ingesta de proteínas de 31 kg/persona/año y en España de 38 kg/persona/año.

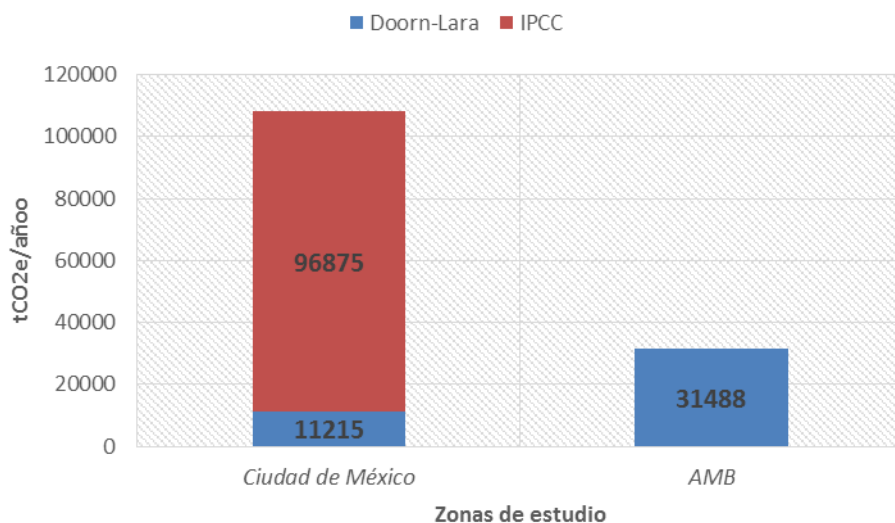


Figura 11. Emisión total CDMX vs AMB 2015.

Como se puede apreciar en la **Figura 12**, la emisión de N₂O calculada a partir de la metodología del IPCC nos da valores de emisión por encima de los valores que se obtienen aplicando las metodologías de Doorn-Liles y Lara-Préndez de manera conjunta. Cabe destacar que la metodología del IPCC considera por defecto igual a cero la emisión de N₂O que se genera del tratamiento de los lodos, aun así esta emisión está un 30% por encima del valor obtenido aplicando las metodologías de Doorn-Liles y Lara-Préndez en el AMB.

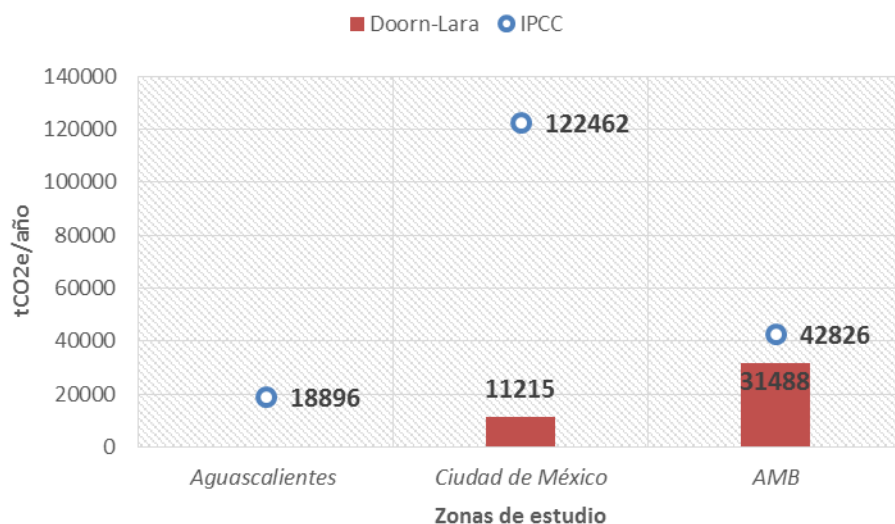


Figura 12. Emisión total N₂O Aguascalientes, Ciudad de México y AMB por ambos métodos.

La metodología de Doorn-Liles considera el porcentaje de agua servida que llega a las PTAR y las características propias de funcionamiento y tratamiento con las que cuentan cada zona de estudio; la metodología del IPCC estima la emisión a partir del porcentaje de aguas servidas de cada zona. En el caso de la Ciudad de México la emisión del tratamiento de aguas y de los lodos

se ve reducida a comparación de la emisión de las aguas servidas, debido a que la ciudad solo cuenta con un 17% de cobertura de tratamiento de estas aguas.

De acuerdo a la metodología de Lara y Préndez existe una emisión de óxido nitroso desde el tratamiento de los lodos, y considerando los valores estimados desde las PTAR analizadas, este valor de emisión debe evaluarse para la cuantificación de inventarios de emisión desde el tratamiento de aguas residuales.

La ingesta de proteínas es un factor a diferenciar entre ambas zonas de estudio y es importante a considerar para la cuantificación de N₂O. La carga orgánica per cápita es un valor particular de cada PTAR y nos permite conocer los datos reales de N que contienen las aguas servidas. La temperatura es otro factor importante a considerar; la CDMX presenta una temperatura mayor (media anual 25 °C) que el AMB (media anual 16 °C) a lo largo del año, y de acuerdo a la literatura y otras investigaciones, a mayor temperatura mayor será la emisión de N₂O (Eijo-Río et al. 2015). El rango de población es diferente entre las zonas de estudio, pero aun con 100% de cobertura de alcantarillado y tratamiento de las aguas residuales, la emisión total de N₂O del AMB es menor en un 71% a la de CDMX.

6 CONCLUSIONES

El óxido nitroso es un GEI que ha incrementado su concentración en la atmósfera durante los últimos 20 años; y el tratamiento de las aguas residuales domésticas es un factor importante de generación de este gas, debido a la cantidad de nitrógeno que está contenida en los alimentos que consume la población.

De acuerdo a los valores de emisión obtenidos, se debe destacar, que la emisión de cada país viene influenciada por su grado de desarrollo, economía y concientización de la población; además que la ingesta de proteínas per cápita, es un factor predominante en este tipo de emisión.

El caso de estudio del AMB es preciso para mostrar los dos tipos de emisión de óxido nitroso, tiene plantas donde se realiza Nitrificación/Desnitrificación para la eliminación de nutrientes antes de verterse al medio receptor y también cuenta con plantas en las que no se realiza este tratamiento. La emisión global de N_2O es mayor a la esperada, pero se muestra muy claramente como las emisiones directas son menores a las emisiones indirectas. Un factor importante a considerar en la emisión global del AMB, es que el 58% de la población total servida con el tratamiento se encuentra en PTAR donde no se realiza eliminación de nutrientes; para minimizar las emisiones de N_2O se debería aplicar eliminación de nutrientes en la PTAR del Besòs, puesto que su mayor población servida está ubicada en esta planta.

En México al no existir tratamiento de eliminación de nutrientes (Nitrificación/Desnitrificación) no se puede mostrar una diferenciación entre PTAR y tecnologías aplicadas para el tratamiento de aguas residuales, así como comparar los dos tipos de emisiones de N_2O que se pueden generar; es por ello que se calcula la emisión del AMB para mostrar la diferencia de usar un tratamiento de eliminación de nutrientes. México necesita primordialmente tratar el 100% de las aguas servidas que genera su población, proporcionar sistemas de alcantarillado a todos los niveles sociales y aplicar la eliminación de nutrientes en sus aguas residuales.

Los resultados obtenidos a partir de las metodologías aplicadas son conforme a lo esperado, aunque existe una discrepancia entre los valores de emisión de N_2O resultado de las diferentes metodologías. La metodología del IPCC considera igual a cero la emisión de óxido nitroso del tratamiento de lodos.

Para la aplicación de la metodología del IPCC en este trabajo se considera despreciable la emisión indirecta de plantas centralizadas avanzadas, de acuerdo a lo considerado por el mismo grupo de expertos; las emisiones directas de N_2O propias del tratamiento de aguas residuales resultan menores e insignificantes al compararlas con las emisiones indirectas del efluente, estos valores son acorde a lo que se presenta en la literatura y de acuerdo a las directrices del IPCC 2006.

La metodología del IPCC no toma en cuenta las diferentes condiciones del proceso de tratamiento ni las diferentes configuraciones, es una metodología general, y el valor que arroja de cálculo se puede considerar sobre estimado.

La metodología de Doorn y Liles es particular para cada tipo de PTAR y condiciones de operación, y se complementa con la metodología propuesta por Lara y Préndez para la emisión desde el tratamiento de los lodos. La emisión de N_2O producida desde el tratamiento de lodos debe evaluarse para realizar los inventarios de emisión desde PTAR.

Para próximas investigaciones se requieren análisis de agua más detallados, para poder utilizar metodologías mecánicas y dinámicas, con datos propios del país y la zona; realizar la caracterización de los lodos, tomar muestras directas del agua de entrada y salida de la planta, y aplicar mediciones in situ de la emisión de N_2O .

La emisión de N_2O una vez expresado en tCO_2e , de acuerdo a su potencial de calentamiento, muestra fuertemente su participación y afectación al medio; es por ello que se requieren de métodos estandarizados y aprobados que sirvan para medir la reducción de emisiones de óxido nítrico, y así aplicar proyectos de mecanismos de desarrollo limpio como los que se aplican en el caso del gas metano.

7 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- AMB, 2016. Datos Estadísticos. *AREA METROPOLITANA DE BARCELONA* [en línea]. Disponible en: http://www.amb.cat/es/web/medi-ambient/aigua/instalacions-i-equipaments/llicitat?p_p_id=EquipamentSearchListPortlet_WAR_AMBSearchPortletportlet&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&_EquipamentSearchListPortlet_WAR_AMBSearchPortletportlet_pageNum=1&_Equipaments.
- BREÑA PUYOL, A.F. y ROJAS SERNA, C., 2015. Problemática y retos del saneamiento de aguas residuales en México: Desafío Ambiental. . S.l.:
- CH2MHILL, 2008. Discussion paper for a wastewater treatment plant sector greenhouse gas emissions reporting protocol, Final report prepared for California Wastewater Climate Change Group, 2008. [en línea]. S.l.: Disponible en: Available at <http://scap1.org/AirReferenceLibrary/Forms/AllItems.aspx>.
- COLOMER-MENDOZA, F.J., GALLARDO IZQUIERDO, A., ROBLES MARTINEZ, F., BOVEA, M.D. y HERRERA PRATS, L., 2010. Opciones de valorización de lodos de distintas estaciones depuradoras de aguas residuales. *Ingeniería*, vol. 14, no. 3, pp. 177-190. ISSN 1665-529X.
- CONAGUA, 2014a. Estadísticas del Agua en México. *Conagua* [en línea], vol. 2014, pp. 242. [Consulta: 15 marzo 2016]. Disponible en: www.conagua.gob.mx.
- CONAGUA, 2014b. Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación Diciembre de 2014. , pp. 397.
- COROMINAS, L., FLORES-ALSINA, X., SNIP, L. y VANROLLEGHEM, P., 2010. Minimising Overall Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants by Implementing Automatic Control. *Proceedings 7th IWA Leading-Edge Conference on Water and Wastewater Technologies. Phoenix, AZ, USA, June 2–4, 2010* [en línea], vol. 20100318, no. 2. Disponible en: <http://biomath.ugent.be/~peter/ftp/pvr912.pdf> \n<http://modeleau.fsg.ulaval.ca/fileadmin/modeleau/documents/Publications/pvr912.pdf>.
- COROMINAS, L., FLORES-ALSINA, X., SNIP, L. y VANROLLEGHEM, P.A., 2012. Comparison of different modeling approaches to better evaluate greenhouse gas emissions from whole wastewater treatment plants. *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 109, no. 11, pp. 2854-2863. ISSN 00063592. DOI 10.1002/bit.24544.
- CRIPPA, M., JANSSENS-MAENHOUT, G., DENTENER, F., GUIZZARDI, D., SINDELAROVA, K., MUNTEAN, M., VAN DINGENEN, R. y GRANIER, C., 2016. Forty years of improvements in European air quality: regional policy-industry interactions with global impacts. *Atmospheric Chemistry and Physics* [en línea], vol. 16, no. 6, pp. 3825-3841. [Consulta: 21 junio 2016]. ISSN 1680-7324. DOI 10.5194/acp-16-3825-2016. Disponible en: <http://www.atmos-chem-phys.net/16/3825/2016/>.
- DAS, S., 2011. Scholarship at UWindsor Estimation of Greenhouse Gases Emissions from Biological Wastewater Treatment Plants at Windsor. ,
- DOORN, M.R.. y LILES, D.S., 1999. *Quantification of methane emissions and discussion of Nitrous oxide, and ammonia emissions from septic tanks, latrines and stagnant open sewers in the world*. S.l.: EPA.
- EIJO-RÍO, E., PETIT-BOIX, A., VILLALBA, G., SUÁREZ-OJEDA, M.E., MARIN, D., AMORES, M.J., ALDEA, X., RIERADEVALL, J. y GABARRELL, X., 2015. Municipal sewer networks as sources

- of nitrous oxide, methane and hydrogen sulphide emissions: A review and case studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [en línea], vol. 3, no. 3, pp. 2084-2094. ISSN 22133437. DOI 10.1016/j.jece.2015.07.006. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2015.07.006>.
- EPA, U. y CHANGE DIVISION, C., 1990. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2014 – Main Text. ,
- FAO, 2015. Proteins-Security-Statistics. *FAO* [en línea]. Disponible en: http://faostat3.fao.org/download/D/*/S.
- FARRELL, A.E., KERR, A.C., BRANDT, A.R., FRANCO, G., BARKALOW, G. y ENERGY-RELATED, P., 2005. GREENHOUSE GAS INVENTORY California Energy Commission. , no. July.
- GENCAT, 2013a. Catalunya i els objectius de reducció d'emissions de gasos amb efecte d'hivernacle Primer informe de progrés Cinquè informe de progrés Compliment del Protocol de Kyoto a Catalunya. [en línea]. S.l.: [Consulta: 31 marzo 2016]. Disponible en: http://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/home/campanyes_i_comunicacio/publicacions/publicacions_de_canvi_climatic/Informes_de_progres_Kioto/Cinque-Informe-de-Progres_Final_amb-tapa.pdf.
- GENCAT, 2013b. Emisiones de GEI en Cataluña. *Generalitat de Catalunya* [en línea]. Disponible en: http://canviclimatic.gencat.cat/es/politiques/inventaris_d_emissions_de_geh/emissions_de_geh_a_catalunya/.
- GT III, I., 2014. CAMBIO CLIMÁTICO 2014 Resumen para responsables de políticas. [en línea]. S.l.: [Consulta: 15 marzo 2016]. Disponible en: http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml.
- GUPTA, D. y SINGH, S.K., 2012. Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants: A Case Study of Noida. *Journal of Water Sustainability*, vol. 1, pp. 131-140.
- HEFFERNAN, B., BLANC, J. y SPANJERS, H., 2012. Evaluation of greenhouse gas emissions from municipal UASB sewage treatment plants. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, no. May 2013, pp. 1-11. ISSN 1943-815X. DOI 10.1080/1943815X.2012.696546.
- HWANG, K.-L., BANG, C.-H. y ZOH, K.-D., 2016. Characteristics of methane and nitrous oxide emissions from the wastewater treatment plant. *Bioresource Technology* [en línea], vol. 214, pp. 881-884. ISSN 09608524. DOI 10.1016/j.biortech.2016.05.047. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.047>.
- INECC, 2013. Inventario de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. [en línea]. S.l.: Disponible en: http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2015_inv_nal_emis_gei_result.pdf.
- INEGI, 2015a. Indicadores de medio ambiente. [en línea]. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/temas/default.aspx?s=est&c=21385>.
- INEGI, 2015b. México en Cifras. *INEGI* [en línea]. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx>.
- IPCC, 2006. Capítulo 6: Tratamiento y eliminación de aguas residuales. *Volumen 5: Desechos*. S.l.: s.n., pp. 31.
- IPCC, 2014. Informe de síntesis. [en línea]. S.l.: Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/index_es.shtml.

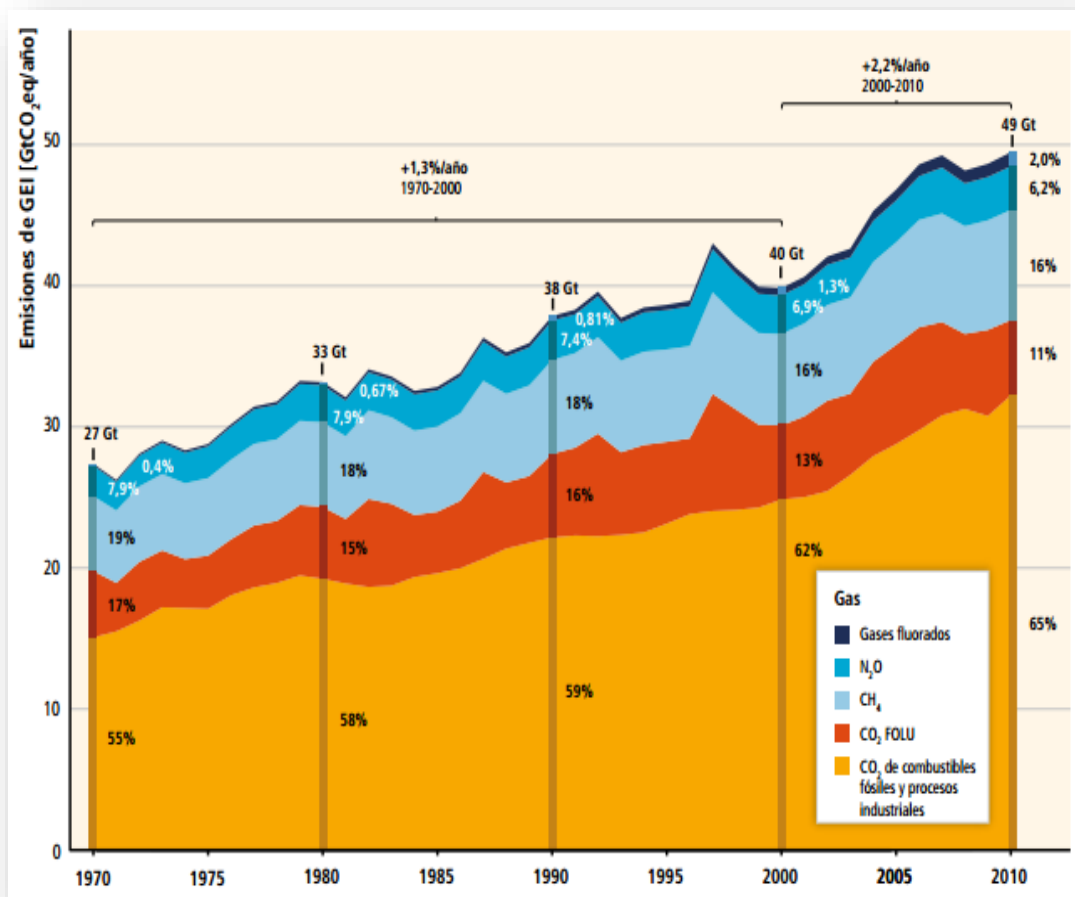
- KAMPSCHREUR, M.J., TEMMINK, H., KLEEREBEZEM, R., JETTEN, M.S.M. y VAN LOOSDRECHT, M.C.M., 2009. Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research*, vol. 43, pp. 4093-4103. DOI 10.1016/j.watres.2009.03.001.
- KYUNG, D., KIM, M., CHANG, J. y LEE, W., 2015. Estimation of greenhouse gas emissions from a hybrid wastewater treatment plant. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 95, pp. 117-123. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.02.032. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.032>.
- LARA, S. y PRÉNDEZ, M., 2003. Aguas Servidas de la región Metropolitana como fuente de gases de efecto Invernadero. . S.l.:
- LAW, Y., YE, L., PAN, Y. y YUAN, Z., 2012. Nitrous oxide emissions from wastewater treatment processes. , pp. 1265-1277. DOI 10.1098/rstb.2011.0317.
- LEXMOND, M.J. y ZEEMAN GRIETJE, 1995. *POTENCIAL OF CONTROLLED ANAEROBIC WASTEWATER TREATMENT IN ORDER TO REDUCE THE GLOBAL EMISSIONS OF METHANE AND CARBON DIOXIDE*. Netherlands: s.n.
- LIMÓN, J.G., 2013. Tratamiento De Aguas Residuales , ¿ Problema O Recurso ? *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?* S.l.:
- METCALF y EDDY, 2014. *Wastewater Engineering. Treatment and Resource Recovery*. 5.ta. New York : McGraw Hill Education .
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, A.Y.M.A., 2014. INVENTARIO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE ESPAÑA 2014. [en línea]. S.l.: [Consulta: 19 junio 2016]. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/1sumarioinventariogeiespana-serie1990-2014_tcm7-417912.pdf.
- MYHRE, G., SHINDELL, D., BRÉON, F.-M., COLLINS, W., FUGLESTVEDT, J., HUANG, J., KOCH, D., LAMARQUE, J.-F., LEE, D., MENDOZA, B., NAKAJIMA, T., ROBOCK, A., STEPHENS, G., TAKEMURA, T., ZHANG, H., STOCKER, [QIN, D., PLATTNER, G.-K., TIGNOR, M., ALLEN, S.K., BOSCHUNG, J., NAUELS, A., XIA, Y., BEX, V. y MIDGLEY, P.M., 2013. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Gunnar Myhre (Norway)*. S.l.:
- NOLASCO, D.A., 2010. Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales. *Banco Interamericano de Desarrollo*, vol. Nota Técn, pp. 103.
- PROFEPA, 2013. Segunda seccion poder ejecutivo secretaria de medio ambiente y recursos naturales. *Diario Oficial*. S.l.:
- RODRIGUEZ-GARCIA, G., HOSPIDO, A., BAGLEY, D.M., MOREIRA, M.T. y FEIJOO, G., 2012. A methodology to estimate greenhouse gases emissions in Life Cycle Inventories of wastewater treatment plants. *Environmental Impact Assessment Review* [en línea], vol. 37, pp. 37-46. ISSN 01959255. DOI 10.1016/j.eiar.2012.06.010. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2012.06.010>.
- RTI, 2010. Greenhouse Gas Emissions Estimation Methodologies for Biogenic Emissions from Selected Source Categories : Solid Waste Disposal Wastewater Treatment Ethanol Fermentation. , no. 0210426, pp. 1-43.
- SEMARNAT, 2015. Características del Acuerdo de París. *SEMARNAT* [en línea], Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/caracteristicas-del-acuerdo-de-paris>.

- SEMARNAT y CONAGUA, 2014. Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. [en línea]. S.I.: Disponible en: www.semarnat.gob.mx.
- SNIP, L., 2010. Quantifying the greenhouse gas emissions of wastewater treatment plants. [en línea], no. December, pp. 1-78. Disponible en: http://modeleau.fsg.ulaval.ca/fileadmin/modeleau/documents/Publications/MSc_s/snip_aura_msc.pdf.
- THOMSEN, M. y LYCK, E., 2005. Emission of CH₄ and N₂O from Wastewater Treatment Plants (6B). *Water*. S.I.: 208.
- UNFCCC, 2015. United Nations Framework Convention on Climate Change. *Acuerdo de París* [en línea]. Disponible en: http://unfccc.int/portal_espanol/items/3093.php.
- US EPA, C.C.D., 2016. Non-CO₂ Greenhouse Gases. *US EPA* [en línea]. [Consulta: 31 marzo 2016]. Disponible en: <https://www3.epa.gov/climatechange/EPAactivities/economics/nonco2projections.html>.
- WG1, I., 2013. 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing BT - Climate Change 2013: The Physical Science Basis. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [en línea], no. 8, pp. 1-141. Disponible en: [papers3://publication/uuid/3FE291E6-1236-4CF0-9EC2-83D39F6664FF](https://publication.uuid/3FE291E6-1236-4CF0-9EC2-83D39F6664FF).

8 ANEXOS

8.1 Anexo A

Emisiones antropogénicas de GEI totales del año 1970 al 2010 a nivel mundial, donde un 76% corresponde a la participación del CO_2 , 16% del metano y un 6,2% del total de emisión de los GEI corresponde al óxido nitroso (IPCC 2014).



8.2 Anexo B

B.1 Aplicación de la metodología del IPCC – Emisión directa

Emisión directa desde el tratamiento de aguas residuales del AMB.

$N_2O_{Plantas} = P \bullet T_{Planta} \bullet FIND-COM \bullet EF_{Planta}$								
Planta	Población (P)	Grado de utilización de las plantas centralizadas modernas (TPlanta)	Fracción de las proteínas industriales y comerciales co-eliminadas (por defecto es 1.25) (FIND-COM)	Factor de emisión (por defecto es 3.2) (EFPlanta)	Total emisión de N₂O procedentes de plantas	Poder de Calentamiento Global para N₂O	Total CO₂	Total CO₂
-	Personas	%	-	gN ₂ O/persona/año	kg N ₂ O/año	265 (IPCC 2014)	kgCO ₂ e/año	tCO ₂ e/año
BEGUES	6,620	1.00	1.25	3.2	26.5	265	7,017.2	7.0
GAVÀ	195,498	1.00	1.25	3.2	782.0	265	207,227.9	207.2
BESÒS	1,596,192	0	1.25	3.2	-	265	-	-
PRAT	994,862	1.00	1.25	3.2	3,979.4	265	1,054,553.7	1,054.6
MONTCADA	257,939	0	1.25	3.2	-	265	-	-
SANT FELIU	159,024	1.00	1.25	3.2	636.1	265	168,565.4	168.6
VALLVIDRERA	4,076	1.00	1.25	3.2	16.3	265	4,320.6	4.3

B.2 Aplicación de la metodología del IPCC – Emisión Indirecta

Estimación de Nitrógeno en el efluente PTAR en el AMB.

Nefluente= (P • Proteína • FNPR • FNON-CON • FIND-COM) - NLodo							
Planta	Población (P)	Consumo per cápita de proteínas (Proteínas)	Fracción de N en las proteínas (FNPR)	Factor de proteínas no consumidas (FNON- CON)	Fracción para proteínas industriales y comerciales co- descargadas (FIND-COM)	Nitrógeno separado con el lodo residual (por defecto es 0) (NLodo)	Total de N en el efluente (Nefluente)
-	Personas	kg/persona/año	kgN/kgProteína	-	-	kgN/año	kgN/año
BESÒS	1,596,192	38.32	0.16	1.4	1.25	0	17126501.7
MONTCADA	257,939	38.32	0.16	1.4	1.25	0	2767582.3

Estimación de emisión indirecta de N₂O desde aguas residuales en el AMB.

Emisiones Totales de N ₂ O= Nefluente • EFEfluente • 44/28							
Planta	Nitrógeno en el efluente (Nefluente)	Factor de emisión para emisiones de N ₂ O proveniente de la eliminación de aguas servidas (EFEfluente)	Factor de conversión de kgN ₂ O-N a kgN ₂ O	Total emisión de N ₂ O	Poder de Calentamiento Global para N ₂ O	Total CO ₂ e	Total CO ₂ e
-	kgN/año	kgN ₂ O-N/kgN	44/28	kgN ₂ O/año	265 (IPCC 2014)	kgCO ₂ e/año	tCO ₂ e/año
BESÒS	17,126,501.68	0.005	1.57	134,443.04	265	35,627,405.13	35627.41
MONTCADA	2,767,582.29	0.005	1.57	21,725.52	265	5,757,263.07	5757.26

Estimación de Nitrógeno en el efluente PTAR en Aguascalientes.

Nefluente= (P • Proteína • FNPR • FNON-CON • FIND-COM) - NLodo							
Planta	Población (P)	Consumo per cápita de proteínas (Proteínas)	Fracción de N en las proteínas (FNPR)	Factor de proteínas no consumidas (FNON-CON)	Fracción para proteínas industriales y comerciales co- descargadas (FIND-COM)	Nitrógeno separado con el lodo residual (por defecto es 0) (NLodo)	Total de N en el efluente (Nefluente)
-	Personas	kg/persona/año	kgN/kg Proteína	-	-	kgN/año	kgN/año
ASIENTOS	3,537	31.39	0.16	1.10	1.25	0	24,425.81
CALVILLO	30,904	31.39	0.16	1.10	1.25	0	213,416.84
CERRO BLANCO	219	31.39	0.16	1.10	1.25	0	1,512.37
CIUDAD	541,688	31.39	0.16	1.10	1.25	0	3,740,788.99
COSÍO NORTE	3,244	31.39	0.16	1.10	1.25	0	22,402.42
EL CEDAZO	69,120	31.39	0.16	1.10	1.25	0	477,328.90
EL REFUGIO DE PEÑUELAS	3,134	31.39	0.16	1.10	1.25	0	21,642.78
FERRONALES		31.39	0.16	1.10	1.25	0	0.00
JALTOMATE	1,899	31.39	0.16	1.10	1.25	0	13,114.11
JESÚS MARÍA	43,012	31.39	0.16	1.10	1.25	0	297,032.27
LOMITA DE PASO BLANCO	15,830	31.39	0.16	1.10	1.25	0	109,318.81
LOS ARELLANO	129,600	31.39	0.16	1.10	1.25	0	894,991.68

LOS SAUCES	51,840	31.39	0.16	1.10	1.25	0	357,996.67
NORIAS DE OJOCALIENTE	1,909	31.39	0.16	1.10	1.25	0	13,183.17
PABELLÓN DE ARTEAGA	28,633	31.39	0.16	1.10	1.25	0	197,733.77
PABELLÓN DE HIDALGO	3,883	31.39	0.16	1.10	1.25	0	26,815.22
PAREDES	1,960	31.39	0.16	1.10	1.25	0	13,535.37
PIVA	9,976	31.39	0.16	1.10	1.25	0	68,892.26
POCITOS	5,169	31.39	0.16	1.10	1.25	0	35,696.08
RINCÓN DE ROMOS	27,988	31.39	0.16	1.10	1.25	0	193,279.53
SAN FCO DE LOS ROMO	13,262	31.39	0.16	1.10	1.25	0	91,584.72
SAN JACINTO	2,306	31.39	0.16	1.10	1.25	0	15,924.77
SAN JOSÉ DE GRACIA	11,000	31.39	0.16	1.10	1.25	0	75,963.80
SAN JUAN DE LA NATURA	653	31.39	0.16	1.10	1.25	0	4,509.49
TEPEZALA	3,537	31.39	0.16	1.10	1.25	0	24,425.81
VILLA JUÁREZ	4,590	31.39	0.16	1.10	1.25	0	31,697.62
VILLAS DE NUESTRA SRA.	55,850	31.39	0.16	1.10	1.25	0	385,688.93
LA NATURA	25,000	31.39	0.16	1.10	1.25	0	172,645.00
JILOTEPEC	683	31.39	0.16	1.10	1.25	0	4,716.66
PALO ALTO	4,810	31.39	0.16	1.10	1.25	0	33,216.90
EMILIANO ZAPATA	2,851	31.39	0.16	1.10	1.25	0	19,688.44
REENCUENTRO	4,750	31.39	0.16	1.10	1.25	0	32,802.55
CIENEGA GRANDE	3,061	31.39	0.16	1.10	1.25	0	21,138.65
COSIO SUR	4,609	31.39	0.16	1.10	1.25	0	31,828.83
EL SALITRE	785	31.39	0.16	1.10	1.25	0	5,421.05
LOMAS DEL REFUGIO	386	31.39	0.16	1.10	1.25	0	2,665.64
TAPIAS VIEJAS	557	31.39	0.16	1.10	1.25	0	3,846.53

EL PILA	15,000	31.39	0.16	1.10	1.25	0	103,587.00
CAMPOS SUR	10,000	31.39	0.16	1.10	1.25	0	69,058.00

Estimación de emisión indirecta de N₂O desde aguas residuales en Aguascalientes.

Emisiones Totales de N ₂ O= Nefluente • EFEfluente • 44/28							
Planta	Nitrógeno en el efluente (Nefluente)	Factor de emisión para emisiones de N ₂ O proveniente de la eliminación de aguas servidas (EFEfluente)	Factor de conversión de kgN ₂ O- N a kgN ₂ O	Total emisión de N ₂ O	Poder de Calentamiento Global para N ₂ O	Total CO ₂ e	Total CO ₂ e
-	kgN/año	kgN ₂ O-N/kgN	44/28	kgN ₂ O/año	265 (IPCC 2014)	kgCO ₂ e/año	tCO ₂ e/año
ASIENTOS	24,425.81	0.005	1.57	191.74	265	50,811.80	50.81
CALVILLO	213,416.84	0.005	1.57	1,675.32	265	443,960.39	443.96
CERRO BLANCO	1,512.37	0.005	1.57	11.87	265	3,146.11	3.15
CIUDAD	3,740,788.99	0.005	1.57	29,365.19	265	7,781,776.30	7,781.78
COSÍO NORTE	22,402.42	0.005	1.57	175.86	265	46,602.62	46.60
EL CEDAZO	477,328.90	0.005	1.57	3,747.03	265	992,963.44	992.96
EL REFUGIO DE PEÑUELAS	21,642.78	0.005	1.57	169.90	265	45,022.39	45.02

FERRONALES	0.00	0.005	1.57	0.00	265	0.00	0.00
JALTOMATE	13,114.11	0.005	1.57	102.95	265	27,280.64	27.28
JESÚS MARÍA	297,032.27	0.005	1.57	2,331.70	265	617,901.38	617.90
LOMITA DE PASO BLANCO	109,318.81	0.005	1.57	858.15	265	227,410.46	227.41
LOS ARELLANO	894,991.68	0.005	1.57	7,025.68	265	1,861,806.44	1,861.81
LOS SAUCES	357,996.67	0.005	1.57	2,810.27	265	744,722.58	744.72
NORIAS DE OJOCALIENTE	13,183.17	0.005	1.57	103.49	265	27,424.29	27.42
PABELLÓN DE ARTEAGA	197,733.77	0.005	1.57	1,552.21	265	411,335.68	411.34
PABELLÓN DE HIDALGO	26,815.22	0.005	1.57	210.50	265	55,782.36	55.78
PAREDES	13,535.37	0.005	1.57	106.25	265	28,156.95	28.16
PIVA	68,892.26	0.005	1.57	540.80	265	143,313.13	143.31
POCITOS	35,696.08	0.005	1.57	280.21	265	74,256.77	74.26
RINCÓN DE ROMOS	193,279.53	0.005	1.57	1,517.24	265	402,069.74	402.07
SAN FCO DE LOS ROMO	91,584.72	0.005	1.57	718.94	265	190,519.11	190.52
SAN JACINTO	15,924.77	0.005	1.57	125.01	265	33,127.51	33.13
SAN JOSÉ DE GRACIA	75,963.80	0.005	1.57	596.32	265	158,023.69	158.02
SAN JUAN DE LA NATURA	4,509.49	0.005	1.57	35.40	265	9,380.86	9.38
TEPEZALA	24,425.81	0.005	1.57	191.74	265	50,811.80	50.81
VILLA JUÁREZ	31,697.62	0.005	1.57	248.83	265	65,938.98	65.94
VILLAS DE NUESTRA SRA.	385,688.93	0.005	1.57	3,027.66	265	802,329.40	802.33
LA NATURA	172,645.00	0.005	1.57	1,355.26	265	359,144.76	359.14
JILOTEPEC	4,716.66	0.005	1.57	37.03	265	9,811.83	9.81

PALO ALTO	33,216.90	0.005	1.57	260.75	265	69,099.45	69.10
EMILIANO ZAPATA	19,688.44	0.005	1.57	154.55	265	40,956.87	40.96
REENCUENTRO	32,802.55	0.005	1.57	257.50	265	68,237.50	68.24
CIENEGA GRANDE	21,138.65	0.005	1.57	165.94	265	43,973.68	43.97
COSIO SUR	31,828.83	0.005	1.57	249.86	265	66,211.93	66.21
EL SALITRE	5,421.05	0.005	1.57	42.56	265	11,277.15	11.28
LOMAS DEL REFUGIO	2,665.64	0.005	1.57	20.93	265	5,545.20	5.55
TAPIAS VIEJAS	3,846.53	0.005	1.57	30.20	265	8,001.75	8.00
EL PILA	103,587.00	0.005	1.57	813.16	265	215,486.86	215.49
CAMPOS SUR	69,058.00	0.005	1.57	542.11	265	143,657.90	143.66

Estimación de Nitrógeno en el efluente PTAR en Ciudad de México.

Nefluente= (P • Proteína • FNPR • FNON-CON • FIND-COM) - NLodo							
Planta	Población (P)	Consumo per cápita de proteínas (Proteínas)	Fracción de N en las proteínas (FNPR)	Factor de proteínas no consumidas (FNON- CON)	Fracción para proteínas industriales y comerciales co- descargadas (FIND-COM)	Nitrógeno separado con el lodo residual (por defecto es 0) (NLodo)	Total de N en el efluente (Nefluente)
-	Personas	kg/persona/año	kgN/kg Proteína	-	-	kgN/año	kgN/año
ABASOLO	1267	31.39	0.16	1.10	1.25	0	8749.65
ACUEDUCTO DE GUADALUPE	29261	31.39	0.16	1.10	1.25	0	202070.61
BOSQUE DE LAS LOMAS	7488	31.39	0.16	1.10	1.25	0	51710.63
CERRO DE LA ESTRELLA	1267200	31.39	0.16	1.10	1.25	0	8751029.76
CIUDAD DEPORTIVA	60480	31.39	0.16	1.10	1.25	0	417662.78
COYOACÁN	7085	31.39	0.16	1.10	1.25	0	48927.59
CHAPULTEPEC	38016	31.39	0.16	1.10	1.25	0	262530.89
EL LLANO	72000	31.39	0.16	1.10	1.25	0	497217.60
IZTACALCO	3122	31.39	0.16	1.10	1.25	0	21559.91
LA LUPITA	5069	31.39	0.16	1.10	1.25	0	35005.50
MAGDALENA	14976	31.39	0.16	1.10	1.25	0	103421.26
PARRES	1152	31.39	0.16	1.10	1.25	0	7955.48
PEMEX-PICACHO	4182	31.39	0.16	1.10	1.25	0	28880.06

RECLUSORIO SUR	43373	31.39	0.16	1.10	1.25	0	299525.26
ROSARIO	4954	31.39	0.16	1.10	1.25	0	34211.33
SAN ANDRÉS MIXQUIC	9446	31.39	0.16	1.10	1.25	0	65232.19
SAN JUAN DE ARAGÓN	92160	31.39	0.16	1.10	1.25	0	636438.53
SAN LUIS TLAXIALTEMALCO	29146	31.39	0.16	1.10	1.25	0	201276.45
SAN LORENZO	57024	31.39	0.16	1.10	1.25	0	393796.34
SAN MIGUEL XICALCO	2880	31.39	0.16	1.10	1.25	0	19888.70
SAN NICOLÁS TETELCO	5011	31.39	0.16	1.10	1.25	0	34604.96
SAN PEDRO ATOCPAN	7891	31.39	0.16	1.10	1.25	0	54493.67
SANTA FE	32832	31.39	0.16	1.10	1.25	0	226731.23
SANTA MARTHA	4723	31.39	0.16	1.10	1.25	0	32616.09
TLATELOLCO	5702	31.39	0.16	1.10	1.25	0	39376.87

Estimación de emisión indirecta de N₂O desde aguas residuales en Ciudad de México.

Emisiones Totales de N ₂ O= Nefluente • EFEfluente • 44/28							
Planta	Nitrógeno en el efluente (Nefluente)	Factor de emisión para emisiones de N ₂ O proveniente de la eliminación de aguas servidas (EFEfluente)	Factor de conversión de kgN ₂ O- N a kgN ₂ O	Total emisión de N ₂ O	Poder de Calentamiento Global para N ₂ O	Total CO ₂ e	Total CO ₂ e
-	kgN/año	kgN ₂ O-N/kgN	44/28	kgN ₂ O/año	265 (IPCC 2014)	kgCO ₂ e/año	tCO ₂ e/año
ABASOLO	8749.65	0.005	1.57	68.68	265	18201.46	18.20
ACUEDUCTO DE GUADALUPE	202070.61	0.005	1.57	1586.25	265	420357.39	420.36
BOSQUE DE LAS LOMAS	51710.63	0.005	1.57	405.93	265	107571.04	107.57
CERRO DE LA ESTRELLA	8751029.76	0.005	1.57	68695.58	265	18204329.66	18204.33
CIUDAD DEPORTIVA	417662.78	0.005	1.57	3278.65	265	868843.01	868.84
COYOACÁN	48927.59	0.005	1.57	384.08	265	101781.63	101.78
CHAPULTEPEC	262530.89	0.005	1.57	2060.87	265	546129.89	546.13
EL LLANO	497217.60	0.005	1.57	3903.16	265	1034336.91	1034.34
IZTACALCO	21559.91	0.005	1.57	169.25	265	44850.00	44.85
LA LUPITA	35005.50	0.005	1.57	274.79	265	72820.19	72.82
MAGDALENA	103421.26	0.005	1.57	811.86	265	215142.08	215.14
PARRES	7955.48	0.005	1.57	62.45	265	16549.39	16.55
PEMEX-PICACHO	28880.06	0.005	1.57	226.71	265	60077.74	60.08

RECLUSORIO SUR	299525.26	0.005	1.57	2351.27	265	623087.43	623.09
ROSARIO	34211.33	0.005	1.57	268.56	265	71168.13	71.17
SAN ANDRES MIXQUIC	65232.19	0.005	1.57	512.07	265	135699.26	135.70
SAN JUAN DE ARAGÓN	636438.53	0.005	1.57	4996.04	265	1323951.25	1323.95
SAN LUIS TLAXIALTEMALCO	201276.45	0.005	1.57	1580.02	265	418705.33	418.71
SAN LORENZO	393796.34	0.005	1.57	3091.30	265	819194.83	819.19
SAN MIGUEL XICALCO	19888.70	0.005	1.57	156.13	265	41373.48	41.37
SAN NICOLÁS TETELCO	34604.96	0.005	1.57	271.65	265	71986.98	71.99
SAN PEDRO ATOCPAN	54493.67	0.005	1.57	427.78	265	113360.45	113.36
SANTA FE	226731.23	0.005	1.57	1779.84	265	471657.63	471.66
SANTA MARTHA	32616.09	0.005	1.57	256.04	265	67849.63	67.85
TLATELOLCO	39376.87	0.005	1.57	309.11	265	81913.74	81.91

B.3 Aplicación de metodología Doorn y Liles – Emisión desde el tratamiento de aguas.

Emisión desde tratamiento de aguas tratadas del AMB.

EMISIONES N ₂ O = FE Σ(P • DBOp • FDBO/100)								
Planta	Factor de emisión (FE)	Población (P)	Carga Orgánica (DBOp)	Fracción DBO fácilmente degradada (FDBO)	Total Emisión N ₂ O	Poder de Calentamiento Global	Total CO ₂ e	TotalCO ₂ e
-	0.051 g N ₂ O/g DBO	Personas	g DBO/persona/año	%	kg N ₂ O/año	265 (IPCC 2014)	kg CO ₂ e/año	t CO ₂ e/año
BEGUES	0.051	6,620	13510.0	1	45.6	265	12087.3	12.1
GAVÀ	0.051	195,498	27025.4	0.83	2245.5	265	595044.9	595.0
BESÒS	0.051	1,596,192	30934.9	0.77	19302.9	265	5115257.1	5115.3
PRAT	0.051	994,862	26388.3	1	13388.9	265	3548058.5	3548.1
MONTCADA	0.051	257,939	23736.3	0.98	3061.3	265	811232.9	811.2
SANT FELIU	0.051	159,024	26278.7	1	2131.3	265	564784.1	564.8
VALLVIDRERA	0.051	4,076	11613.0	1	24.1	265	6397.2	6.4

Emisión desde tratamiento de aguas tratadas de la CDMX.

EMISIONES N ₂ O = FE Σ(P • 365 • DBOp • FDBO/100)								
Planta	Factor de emisión (FE)	Población (P)	Carga orgánica per cápita (DBOp)	Fracción DBO fácilmente degradada (FDBO)	Total Emisión N ₂ O	Poder de Calentamiento Global	Total CO ₂ e	TotalCO ₂ e
-	0.051 g N ₂ O/g DBO	Personas	g DBO/persona/día	%	kg N ₂ O/año	265 (IPCC 2014)	kg CO ₂ e/año	tCO ₂ e/año
ABASOLO	0.051	1267	298.7	1.0	70.2	265	18606.6	18.6
ACUEDUCTO DE GUADALUPE	0.051	29261	56.7	1.0	308.1	265	81637.8	81.6
BOSQUE DE LAS LOMAS	0.051	7488	32.2	1.0	44.2	265	11718.6	11.7
CERRO DE LA ESTRELLA	0.051	1267200	25.9	1.0	5881.2	265	1558518.6	1558.5
CIUDAD DEPORTIVA	0.051	60480	42.4	1.0	471.6	265	124980.3	125.0
COYOACÁN	0.051	7085	24.5	1.0	31.9	265	8446.2	8.4
CHAPULTEPEC	0.051	38016	57.2	1.0	403.6	265	106957.2	107.0
EL LLANO	0.051	72000	54.8	0.74	542.8	265	143845.6	143.8
IZTACALCO	0.051	3122	46.6	1.0	27.0	265	7151.4	7.2
LA LUPITA	0.051	5069	55.7	1.0	51.5	265	13645.1	13.6
MAGDALENA	0.051	14976	15.3	0.95	40.4	265	10697.0	10.7
PARRES	0.051	1152	239.2	1.0	51.3	265	13586.4	13.6
PEMEX-PICACHO	0.051	4182	58.5	1.0	45.3	265	12005.2	12.0
RECLUSORIO SUR	0.051	43373	23.7	1.0	190.6	265	50516.4	50.5
ROSARIO	0.051	4954	19.3	1.0	17.5	265	4637.6	4.6
SAN ANDRES MIXQUIC	0.051	9446	25.7	1.0	43.8	265	11607.4	11.6

SAN JUAN DE ARAGÓN	0.051	92160	34.6	1.0	587.3	265	155647.3	155.6
SAN LUIS	0.051	29146	23.2	1.0	121.2	265	32114.9	32.1
TLAXIALTEMALCO								
SAN LORENZO	0.051	57024	33.4	0.86	304.6	265	80719.7	80.7
SAN MIGUEL XICALCO	0.051	2880	144.7	1.0	77.1	265	20435.4	20.4
SAN NICOLÁS TETELCO	0.051	5011	119.0	1.0	109.9	265	29126.3	29.1
SAN PEDRO ATOCPAN	0.051	7891	166.1	1.0	242.8	265	64330.7	64.3
SANTA FE	0.051	32832	75.7	1.0	459.7	265	121819.1	121.8
SANTA MARTHA	0.051	4723	20.8	0	0.0	265	0.0	0.0
TLATELOLCO	0.051	5702	31.5	1.0	32.7	265	8664.8	8.7

B.4 Aplicación de metodología Lara y Préndez – Emisión desde el tratamiento de lodos.

Emisión desde tratamiento de lodos del AMB.

Planta	Lodos		N ₂ O en Lodos = $L_p \cdot NI \cdot FEN \cdot Fconv$								Total CO ₂ e
	Caudal entrada	Por cada 1000 m ³	Producción de sólidos secos	Producción de lodos por planta	Lodo producido por planta de tratamiento (L _p)	Contenido de N en el lodo (NI)	Factor de emisión directa N ₂ O (FEN)	Factor de conversión de kg N ₂ O-N en kg N ₂ O (Fconv)	Emisión anual de N ₂ O desde lodo tratado y dispuesto	Poder de Calentamiento Global	
-	m ³ /año	-	kg/1000 m ³	kg lodo/año	t/año	3.62%	kg N ₂ O-N/kg N en lodo producido	44/28	t N ₂ O/año	265 (IPCC 2014)	tCO ₂ e/año
BEGUES	340,062	340.1	220	74813.6	74.8	0.0362	0.025	1.57	0.1063	265	28.2
GAVÀ	13,547,225	13547.2	220	2980389.5	2980.4	0.0362	0.025	1.57	4.2	265	1122.2
BESÒS	116,457,659	116457.7	220	25620685.0	25620.7	0.0362	0.025	1.57	36.4	265	9646.8
PRAT	86,357,714	86357.7	220	18998697.1	18998.7	0.0362	0.025	1.57	27.0	265	7153.5
MONTCADA	17,149,895	17149.9	220	3772976.9	3773.0	0.0362	0.025	1.57	5.4	265	1420.6
SANT FELIU	17,412,261	17412.3	220	3830697.4	3830.7	0.0362	0.025	1.57	5.4	265	1442.4
VALLVIDRERA	258,658	258.7	220	56904.8	56.9	0.0362	0.025	1.57	0.0809	265	21.4



Emisión desde tratamiento de lodos de la CDMX.

Planta	Lodos			N ₂ O en Lodos = Lp • NI • FEN • Fconv							
	Caudal entrada	Por cada 1000 m ³	Producción de sólidos secos	Producción de lodos por planta	Lodo producido por planta de tratamiento (Lp)	Contenido de N en el lodo (NI)	Factor de emisión directa N ₂ O (FEN)	Factor de conversión de kg N ₂ O-N en kg N ₂ O (Fconv)	Emisión anual de N ₂ O desde lodo tratado y dispuesto	Poder de Calentamiento Global	Total CO ₂ e
-	m3/año	-	kg/1000 m ³	kg lodo/año	t/año	3.62%	kg N ₂ O-N/kg N en lodo producido	44/28	tN ₂ O/año	265 (IPCC 2014)	tCO ₂ e/año
ABASOLO	75686.4	75.7	220	16651.0	16.7	0.037	0.025	1.57	0.0242	265	6.4
ACUEDUCTO DE GUADALUPE	1740787.2	1740.8	220	382973.2	383.0	0.037	0.025	1.57	0.5562	265	147.4
BOSQUE DE LAS LOMAS	444657.6	444.7	220	97824.7	97.8	0.037	0.025	1.57	0.1421	265	37.6
CERRO DE LA ESTRELLA	75371040.0	75371.0	220	16581628.8	16581.6	0.037	0.025	1.57	24.1	265	6381.4
CIUDAD DEPORTIVA	3598257.6	3598.3	20	71965.2	72.0	0.037	0.025	1.57	0.1045	265	27.7
COYOACÁN	419428.8	419.4	220	92274.3	92.3	0.037	0.025	1.57	0.1340	265	35.5
CHAPULTEPEC	2261131.2	2261.1	220	497448.9	497.4	0.037	0.025	1.57	0.7224	265	191.4
EL LLANO	4257360.0	4257.4	220	936619.2	936.6	0.037	0.025	1.57	1.3602	265	360.5
IZTACALCO	187639.2	187.6	20	3752.8	3.8	0.037	0.025	1.57	0.0054	265	1.4
LA LUPITA	299592.0	299.6	220	65910.2	65.9	0.037	0.025	1.57	0.0957	265	25.4
MAGDALENA	889315.2	889.3	210	186756.2	186.8	0.037	0.025	1.57	0.2712	265	71.9
PARRES	68433.1	68.4	220	15055.3	15.1	0.037	0.025	1.57	0.0219	265	5.8



PEMEX- PICACHO	248819.0	248.8	220	54740.2	54.7	0.037	0.025	1.57	0.0795	265	21.1
RECLUSORI O SUR	867240.0	867.2	220	190792.8	190.8	0.037	0.025	1.57	0.2771	265	73.4
ROSARIO	293284.8	293.3	220	64522.7	64.5	0.037	0.025	1.57	0.0937	265	24.8
SAN ANDRES MIXQUIC	561340.8	561.3	300	168402.2	168.4	0.037	0.025	1.57	0.2446	265	64.8
SAN JUAN DE ARAGÓN	5484110.4	5484.1	220	1206504.3	1206.5	0.037	0.025	1.57	1.7521	265	464.3
SAN LUIS TLAXIALTEM ALCO	1734480.0	1734.5	220	381585.6	381.6	0.037	0.025	1.57	0.5542	265	146.9
SAN LORENZO	3374352.0	3374.4	220	742357.4	742.4	0.037	0.025	1.57	1.0781	265	285.7
SAN MIGUEL XICALCO	171240.5	171.2	220	37672.9	37.7	0.037	0.025	1.57	0.0547	265	14.5
SAN NICOLÁS TETELCO	296438.4	296.4	220	65216.4	65.2	0.037	0.025	1.57	0.0947	265	25.1
SAN PEDRO ATOC PAN	469886.4	469.9	220	103375.0	103.4	0.037	0.025	1.57	0.1501	265	39.8
SANTA FE	1955232.0	1955.2	24	46925.6	46.9	0.037	0.025	1.57	0.0681	265	18.1
SANTA MARTHA	280670.4	280.7	220	61747.5	61.7	0.037	0.025	1.57	0.0897	265	23.8
TLATELOLCO	337435.2	337.4	220	74235.7	74.2	0.037	0.025	1.57	0.1078	265	28.6

8.3 Anexo C

C.1 Listado de PTAR en la Ciudad de México

PTAR de la Ciudad de México y el tipo de tratamiento empleado.

Planta	Tipo de Tratamiento
ABASOLO	Lodos activados
ACUEDUCTO DE GUADALUPE	Lodos activados
BOSQUE DE LAS LOMAS	Lodos activados
CERRO DE LA ESTRELLA	Lodos activados
CIUDAD DEPORTIVA	Filtración
COYOACÁN	Lodos activados
CHAPULTEPEC	Lodos activados
EL LLANO	Lodos activados
IZTACALCO	Filtración
LA LUPITA	Lodos activados
MAGDALENA	Filtros biológico
PARRES	Lodos activados
PEMEX-PICACHO	Lodos activados
RECLUSORIO SUR	Lodos activados
ROSARIO	Lodos activados
SAN ANDRES MIXQUIC	Primario avanzado
SAN JUAN DE ARAGÓN	Lodos activados
SAN LUIS	Lodos activados
TLAXIALTEMALCO	
SAN LORENZO	Lodos activados
SAN MIGUEL XICALCO	Lodos activados
SAN NICOLÁS TETELCO	Lodos activados



SAN PEDRO ATOCPAN	Lodos activados
SANTA FE	Humedales
SANTA MARTHA	Lodos activados
TLATELOLCO	Lodos activados